



国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA

N
S
F
C

工程与材料科学系列



基于性能的结构抗震设计 ——理论、方法与应用

李刚 程耿东 著



Engineering
Material

科学出版社



国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



基于性能的结构抗震设计 ——理论、方法与应用

李 刚 程耿东 著

科学出版社

内 容 简 介

本书较系统地介绍了基于性能的抗震设计思想、理论和方法,建立起了基于性能的结构抗震优化设计的框架,着重介绍了作者多年来的相关研究成果,主要包括基于投资-效应准则的优化设计模型的建立、基于性能的目标可靠度优化决策、结构分灾抗震设计及基础隔震结构一体化优化设计、结构可靠度分析及基于可靠度的优化设计算法研究、ANSYS软件二次开发及其在实际工程中的应用等。

本书可供土木工程、工程力学等专业的科学研究人员、工程技术人员、研究生以及高等院校的教师和本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于性能的结构抗震设计——理论、方法与应用/李刚,程耿东著.

—北京:科学出版社,2004.12

ISBN 7-03 014504-6

I. 基… II. ①李…②程… III. 建筑结构-抗震设计

IV. TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 108076 号

责任编辑:杨家福 / 责任校对:张 琪

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 12 月 第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2004 年 12 月 第一次印刷 印张:21

印数:1—2 500 字数:408 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

进入 21 世纪,我国国民经济腾飞,大量的资金投入基础设施的建设,一大批形式多样的大型复杂结构系统需要设计和施工建设,人们希望建造跨度更大的桥梁和空间结构,高度更高、造型更适应时代审美观的高层建筑,体型更复杂、功能更完美的各类特种结构;这一日益增长的新需求和新挑战使土木工程界面临不断出现的新问题、新困难。为了满足新需求、解决新问题,围绕结构形式、建筑材料和施工技术人们不断提出新的对策。新需求、新问题、新对策的互动发展,要求土木工程界建立新的设计理念和概念、新的设计理论和方法。回顾土木工程的发展历史,设计理念和概念、设计理论和方法的变革对土木工程的进步具有根本性、全局性的影响,它们深刻地影响着设计规范、规程的制定和修改,影响着工程师每天的设计实践。

在设计和建造我国当代大型复杂结构系统时,设计者面临很多新的科学问题,例如,大型复杂结构系统的设计和建造投资巨大,对社会发展往往影响深远,要求人们以尽可能少的投入来建设具有较高的安全度、较强的适应环境和抵御灾害能力、功能要求更为复杂和精细的结构。设计人员必须改变单纯的技术观点,必须从社会-经济-技术的角度来比较设计方案,在设计中要有系统的、全局的和全寿命的观点,要考虑能源、环境的可持续发展;这些都迫切需要我们提出新的结构设计理念和设计方法来予以解决。

地震是自然灾害中危害最大的灾种之一,也是绝大部分工程结构的控制荷载。在人类历史上曾经发生过造成巨大人员伤亡的地震灾害,例如 1976 年中国唐山大地震,1993 年印度 Killari 地震和 1999 年土耳其 Izmit 地震等。随着现代工业化和城市化的进程,一些国家和地区的城市数量急剧增加,人口高度密集,财富也高度集中。由于在这些城市和地区采取不断进步的结构设防措施,在城市周边发生的地震灾害造成的人员伤亡显著下降,但是造成的经济损失则是令世人震惊的。例如,1989 年美国 Loma Prieta 地震、1994 年美国 Northridge 地震、1995 年日本阪神地震和 1999 年我国台湾集集镇地震在这方面都给我们带来了深刻的教训。

地震灾害的高度不确定性和现代地震灾害引起巨大经济损失的新特点,引起世界各国地震工程界对现有抗震设计思想和方法进行深刻的反思。进一步探讨更完善的结构抗震设计思想和方法成为迫切的需要。目前各国抗震规范中普遍采用的“小震不坏、中震可修、大震不倒”设防水准,被认为是目前处理地震作用高度不确定性的最科学合理的对策,这种设计思想在实践中也已取得巨大的成功。事实上,在发达国家和地区,即使在人口高度密集的城市周边区域,由于绝大多数建筑物按现行的抗震规范设计或加固,重大地震灾害造成的人员伤亡已经明显下降。然

而,这种设计思想是以保障生命安全为主要设防目标的,尽管它可以做到大震时主体结构不倒以保障生命安全,但它可能导致中小震下结构正常使用功能的丧失而引起巨大的经济损失。特别是随着经济的发展,结构物内的装修、非结构构件、信息技术装备等的费用往往大大超过结构物的费用,这种损失会更加严重。

基于性能的抗震设计思想就是在这样的背景下由美国学者于 20 世纪 90 年代初提出。基于性能的抗震设计是使设计出的结构在未来的地震灾害下能够维持所要求的性能水平,它要求在结构设计中从以往只注重结构安全,向全面注重结构的性能、安全及经济等诸多方面发展。投资-效益准则和建筑结构目标性能的“个性化”是基于性能的抗震设计的重要思想。基于性能的结构抗震设计代表了未来结构抗震设计的发展方向,引起了各国广泛的重视,美、日等国都投入许多力量进行研究;而且日本已于 2000 年 6 月采用了新的基于性能的结构抗震规范。我国在国家自然科学基金委员会的支持下,也积极开展了这方面的研究。

从 20 世纪 90 年代中期开始,我们在国内就较早开始了基于性能的抗震设计方面的研究,先后主持完成了多项有关的国家自然科学基金项目,包括国家自然科学基金“八五”重大项目“城市与工程减灾基础研究”(59493300)中的 2.2 专题“抗灾结构的优化设计”、国家自然科学基金“九五”重大项目“大型复杂结构体系的关键科学问题和设计理论”(59895410)中的 7.1 专题“基于可靠度的多目标复杂结构优化设计方法”以及国家自然科学基金青年项目“基于功能的现有结构抗震加固维修研究”(50008003)等。研究中,我们将结构优化设计理论、可靠度分析与基于性能的抗震设计结合起来,着重研究了实施基于性能的结构抗震设计时遇到的一系列问题,包括基于投资-效益准则的优化设计模型的建立、基于性能的目标可靠度优化决策、结构分灾抗震设计及基础隔震结构一体化优化设计、结构可靠度分析及基于可靠度的优化设计算法研究、ANSYS 软件二次开发及其在实际工程中的应用等。本书是我们多年研究成果的总结。全书分为 10 章,主要内容安排如下。

第一章回顾了结构抗震设计思想的发展概况,简单介绍了基于性能的抗震设计基本思想、研究状况。

第二章从投资-效益准则、结构寿命周期内的总费用评估、人员伤亡损失评估、结构失效损失值估计、基于模糊理论的结构总费用评估等方面,对基于性能的结构抗震设计理论中的有关问题进行了讨论。

第三章提出了结构目标可靠度优化决策的三种模型,介绍了最优设防荷载、结构目标设计强度的基本思想和方法,并对目标性能水平的不同表述的特点和联系做了讨论。

第四章在对工程设计实践中的有关经验分析总结的基础上,提出了结构分灾抗震设计概念、设计原则和计算模型,探讨了结构分灾抗震优化设计和基于投资-效益准则的设计之间的关系。

第五章考虑了地震作用、结构构件面积、材料弹性模量、材料屈服强度、恒荷载

和活荷载的随机性,在大量抽样计算的基础上采用概率统计理论中的 K-S 检验法,得到了结构整体抗力和地震响应的概率统计特性及有关统计参数,为研究可靠度近似分析提供了参考。

第六章是结构可靠度分析算法研究,对一次二阶矩法和两点自适应法进行了改进,对 ANSYS 软件进行二次开发并在此基础上进行工程结构可靠度分析,讨论了矩方法计算可靠度的局限性,提出了基于结构响应灵敏度的近似重要性抽样法和灾害荷载下的结构体系可靠度近似计算方法,最后从混沌动力学角度探讨了一次二阶矩法不收敛的原因。

第七章分别考虑了单元可靠度约束和体系可靠度约束的情况,提出了求解基于可靠度的优化设计问题的近似序列规划算法,并基于 ANSYS 软件二次开发实现了该算法。

第八章把基于性能的抗震优化设计理论和方法用于钢筋混凝土结构的抗震优化设计中,提出了适合土木工程结构优化问题的改进枚举法,并探讨了结构不同局部破坏模式对结构性能的影响。

第九章是基于性能的抗震优化设计理论在基础隔震结构中的应用,建立了基于投资-效益准则的基础隔震结构一体化优化设计模型,分别采用反应谱法和时程分析进行了优化设计,讨论了近场地震动对隔震结构设计的影响,并在此基础上进行了隔震结构优化设计。

第十章介绍静力弹塑性 Pushover 分析方法的基本理论和研究概况,并着重研究了平面不对称结构、空间偏心结构和底层薄弱结构等在不同加载模式下的 Pushover 分析。

许林和杨迪雄博士、刘永和卢华硕士结合他们的学位论文参加了本书部分内容的研究工作,其中许林撰写了第 6 章的 6.1~6.4 节和第 7 章的内容,杨迪雄撰写了第 6 章的 6.8 节以及第 9 章的内容,在此表示感谢!

需要指出,基于性能的抗震设计思想,代表了现代结构抗震设计的发展方向,我国土木工程界需要更多的人了解和研究这一方向的有关问题,然而目前还缺乏相关的专著。撰写本书的目的主要有两方面:一是介绍我们多年来的研究工作;二是向读者介绍基于性能的抗震设计思想。由于我们的研究工作是在国家自然科学基金项目支持下的应用基础研究,本书的有些内容相对于目前的设计实际比较超前,也许还无法直接应用到当前的工程实际,但我们在书中试图建立起基于投资-效益准则的结构抗震优化设计这样一种框架,并对涉及的一些问题开展了研究,希望有助于读者对基于性能的结构设计思想的了解。

感谢国家自然科学基金委员会多年来对我们研究工作的资助!

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 结构抗震设计思想发展概述	1
1.2 基于性能的结构抗震设计	2
参考文献	13
第二章 结构全寿命总费用评估	16
2.1 投资-效益准则	16
2.2 基于投资-效益准则的抗震优化设计模型	17
2.3 结构寿命周期总费用评估.....	20
2.4 人员伤亡损失评估.....	37
2.5 基于模糊综合评判的结构寿命周期总费用评估.....	45
参考文献	60
第三章 基于投资-效益准则的结构目标性能	63
3.1 结构目标可靠度的优化决策.....	64
3.2 结构目标设计强度的优化决策.....	72
3.3 结构目标设防烈度的优化决策.....	75
3.4 结构目标性能优化决策的讨论.....	77
参考文献	80
第四章 基于投资-效益准则的结构分灾抗震设计	81
4.1 结构分灾抗震设计概念.....	81
4.2 结构分灾抗震优化设计模型.....	90
4.3 结构分灾抗震优化设计算例.....	93
4.4 结构分灾抗震设计与基于投资-效益准则的设计	99
参考文献.....	101
第五章 结构整体抗力及地震响应的概率统计特性	103
5.1 有关随机变量的统计特性及 K-S 检验方法	103
5.2 钢筋混凝土框架弹性层间变形的概率统计特性	107
5.3 钢框架最大层间弹塑性变形的概率统计特性	114
5.4 基于 Pushover 分析的钢框架地震响应的概率统计特性.....	120
5.5 基于 Pushover 分析的钢框架整体抗力的概率统计特性.....	125
5.6 结构可靠度近似分析方法	128
参考文献.....	131

第六章 结构可靠度分析	132
6.1 结构可靠度的基本理论和研究概况	132
6.2 改进的一次可靠度迭代算法	140
6.3 ANSYS 软件二次开发及工程结构可靠度分析	147
6.4 可靠度计算的矩方法及其讨论	156
6.5 基于优化算法的结构体系可靠度分析	162
6.6 基于结构响应灵敏度的近似重要性抽样法	168
6.7 灾害荷载下的结构体系可靠度近似计算	172
6.8 基于混沌动力学的一次可靠度方法收敛性探讨	178
参考文献.....	188
第七章 基于可靠度的结构优化模型与算法	193
7.1 基于可靠度的结构优化模型和研究概况	193
7.2 基于单元可靠度的结构优化的序列近似规划	196
7.3 基于系统可靠度的结构优化的序列近似规划	214
参考文献.....	228
第八章 基于性能的钢筋混凝土结构抗震优化设计	231
8.1 基于性能的钢筋混凝土结构抗震优化设计模型	231
8.2 钢筋混凝土结构地震响应分析	237
8.3 结构局部破坏模式的研究	241
8.4 针对土木工程结构优化问题的改进枚举法	245
8.5 钢筋混凝土结构抗震优化设计算例	250
参考文献.....	254
第九章 基于性能的基础隔震结构一体化优化设计	255
9.1 基础隔震结构的研究概况	255
9.2 基础隔震结构一体化优化设计模型	261
9.3 基于反应谱法的基础隔震结构优化设计	265
9.4 基于时程分析的基础隔震结构优化设计	274
9.5 考虑近场地震动作用的基础隔震结构优化设计	278
参考文献.....	289
第十章 结构非线性静力 Pushover 分析	293
10.1 Pushover 分析方法的基本理论和研究概况	294
10.2 平面不对称结构的 Pushover 分析	306
10.3 空间偏心结构的 Pushover 分析	310
10.4 底层薄弱结构的 Pushover 分析	314
参考文献.....	322

CONTENTS

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Development of the Concepts of Structural Seismic Design	1
1.2 Performance Based Seismic Design	2
References	13
Chapter 2 Evaluation of Structural Life-cycle Cost	16
2.1 Cost-effectiveness Criterion	16
2.2 Cost-effectiveness Criterion Based Structural Seismic Optimum Design	17
2.3 Evaluation of Structural Life-cycle Cost	20
2.4 Evaluation of Cost with Injury and Death	37
2.5 Evaluation of Structural Life-cycle Cost with Fuzzy Comprehensive Theory	45
References	60
Chapter 3 Cost-effectiveness Criterion Based Structural Target Performance 	63
3.1 Optimal Decision for Structural Target Reliability	64
3.2 Optimal Decision for Structural Target Design Strength	72
3.3 Optimal Decision for Structural Target Fortification Intensity	75
3.4 Discussion on Optimal Decision for Structural Target Performance	77
References	80
Chapter 4 Cost-effectiveness Criterion Based Structural Seismic Design by Damage-reduction	81
4.1 Concept of Structural Seismic Design by Damage-reduction	81
4.2 Models of Structural Seismic Design by Damage-reduction	90
4.3 Examples of Structural Seismic Design by Damage-reduction	93
4.4 Structural Seismic Design by Damage-reduction and Cost-effective design	99
References	101
Chapter 5 Statistical Properties of Structural Global Resistance and Seismic Reponses	103
5.1 Statistical Properties of Related Random Variables and K-S Test	

.....	103
5.2 Statistical Properties of Elastic Story Drift Ratio of RC Frames	107
5.3 Statistical Properties of Maximum Elastoplastic Story Drift Ratio of Steel Frames	114
5.4 Statistical Properties of Seismic Responses of Steel Frames by Pushover Analysis	120
5.5 Statistical Properties of Structural Global Resistance of Steel Frames by Pushover Analysis	125
5.6 Approximate Approach of Structural Reliability Analysis	128
References	131
Chapter 6 Structural Reliability Analysis	132
6.1 Basic Theory and State of the Art of the Research of Structural Reliability Analysis	132
6.2 Improved First Order Reliability Iteration Method	140
6.3 Further Exploitation of ANSYS Software and Reliability Analysis of Engineering Structures	147
6.4 Moment Methods of Reliability Calculation and Discussion	156
6.5 Structural System Reliability Analysis with Optimization Algorithms	162
6.6 Approximate Importance Sampling Method Based on Sensitivity Analysis of Structural Responses	168
6.7 Approximate Calculation of Structural System Reliability Subjected to Hazard Loads	172
6.8 Discussion on Convergence of the First Order Second Moment Method from the Viewpoint of Chaotic Dynamics	178
References	188
Chapter 7 Models and Algorithms of Reliability Based Structural Optimization	193
7.1 Models and Developments of Reliability Based Structural Optimization	193
7.2 Component Reliability Based Structural Optimization by Approximate Sequential Programming	196
7.3 System Reliability Based Structural Optimization by Approximate Sequential Programming	214
References	228

Chapter 8 Performance Based Seismic Optimum Design for RC Structures	231
8.1 Formulations of Performance Based Seismic Optimum Design of RC Structures	231
8.2 Seismic Response Analysis of RC Structures	237
8.3 Structural Partially Damage Modes	241
8.4 Improved Enumeration Method for Optimization Problems of Civil Engineering	245
8.5 Examples of Seismic Optimum Design for RC Structures	250
References	254
Chapter 9 Performance Based Integrated Optimum Design of Isolated Structures	255
9.1 State of the Art of Research on Isolated Structures	255
9.2 Integrated Optimum Design Formulations of Isolated Structures	261
9.3 Integrated Optimum Design of Isolated Structures Using Response Spectra Method	265
9.4 Integrated Optimum Design of Isolated Structures Using Time History Analysis	274
9.5 Integrated Optimum Design of Isolated Structures under the Near Field Ground Motions	278
References	289
Chapter 10 Nonlinear Static Pushover Analysis	293
10.1 Basic Theory and Development of Nonlinear Static Pushover Analysis	294
10.2 Nonlinear Static Pushover Analysis of Plane Asymmetric Structures	306
10.3 Nonlinear Static Pushover Analysis of Spatial Eccentric Structures	310
10.4 Nonlinear Static Pushover Analysis of Structures with Lower Weak Story	314
References	322

第一章 绪 论

1.1 结构抗震设计思想发展概述

地震是自然灾害中危害最大的灾种之一,也是绝大部分工程结构的控制荷载。人类历史上曾经发生过造成巨大人员伤亡的地震灾害,例如 1976 年中国唐山 M7.8 级大地震,伤亡人数超过 40 万,1993 年印度 Killari M6.4 级地震近 3 万人死亡和失踪,1999 年土耳其 Izmit M7.4 级地震死 1.5 万余人,伤 2 万余人。

随着现代工业化和城市化的进程,一些国家和地区城市的数量急剧增加,人口高度密集,财富也高度集中。由于在这些城市和地区不断进步的结构设防措施,在城市周边发生的地震灾害造成的人员伤亡显著下降,但是造成的经济损失则是令世人震惊的。例如,1989 年,美国 Loma Prieta M7.1 级地震,伤亡数百人,经济损失为 150 亿美元;1994 年,美国 Northridge M6.7 级地震,伤亡仅 57 人,经济损失为 170 亿美元;1995 年,日本阪神 M7.1 级地震,死亡 5500 多人,经济损失达到创纪录的 1000 亿美元,震后的基本恢复重建工作花费 2 年,耗资近 1000 亿美元;1999 年,我国台湾集集镇 M7.3 级地震,死亡 2405 人,伤 11306 人,经济损失近 100 亿美元。与此相比,唐山 M7.8 级大地震的经济损失仅为 100 亿人民币(按当时人民币与美元比价,仅为 50 多亿美元)。

地震灾害的高度不确定性和现代地震灾害引起巨大经济损失的新特点,引起世界各国地震工程界对现有抗震设计思想和方法进行深刻的反思,进一步探讨更完善的结构抗震设计思想和方法成为迫切的需要。下面我们对结构抗震设计的发展做一简要回顾与总结。经过近 100 年的科学研究和工程实践,结构抗震设计经过了以下发展阶段。

(1) 刚性设计。这种设计是要大大增加结构的刚度,使其与基础成为一个刚性整体。在这种设计概念指导下,结构的高度、跨度和复杂性都受到严重的限制,在历史上,曾束缚了在地震多发区结构设计的进步。

(2) 柔性设计。与“刚性结构体系”设计相反,“柔性结构体系”设计是减小结构的刚度,这样虽然可以有效地减少作用于结构的地震荷载强度,但是在震作用下会由于结构变形过大而导致结构破坏,甚至倒塌;在小震及常规荷载作用下,又会由于刚度过低而很难满足结构的正常使用要求。

(3) 延性设计。这是目前采用较为普遍的设计概念,即适当控制结构的刚度分布,使结构构件(如梁、柱、墙、节点等)在地震时进入非弹性变形状态,以消耗地震能量,保证结构不倒塌。这种设计中,所有结构构件集两种功能于一身,既要保证结

构的使用功能,又要能在地震发生时有抗震功能,这必然存在着局限性,如:有些重要结构的承重构件不允许进入非弹性变形状态;一般结构的承重构件虽然允许进入非弹性变形状态,但这种破坏很难修复;对于有些内部有豪华装修或贵重仪器的结构,承重构件的非弹性变形将导致豪华装修或仪器的损坏或无法正常工作,而由此造成的间接经济损失有时是非常巨大的。

(4) 结构控制设计。以上各种设计概念都是通过调整结构构件本身的刚度来抵御灾害作用的,而结构控制则是通过在结构上设置控制机构,由控制机构和结构共同抵御地震及风载的作用。结构控制分为主动控制(需要外部能源)、半主动控制(需要少量的外部能源)、被动控制(不需要外部能源)和混合控制(主动控制与被动控制的结合)。近 20 多年来,结构控制在理论研究和模型试验等方面都取得了很大的进展,而且日本、美国、加拿大、意大利、新西兰和中国等都建起了一些利用结构控制技术的建筑和桥梁(主要是采用基础隔震和阻尼器耗能减震等被动控制措施)。

不过,目前结构控制在土木工程结构的实际应用中还存在一些问题:① 主动控制措施虽然具有良好的适应性,但由于土木结构本身的质量非常巨大,所以需要的外部能量也很大,这是很难在实际灾害发生时能够得到保证的。另外,主动控制中的溢出影响、迟时效应等也是需要加以解决的难题;② 许多被动控制措施(如 TMD、TLD 等)在小震和常规风载作用下对于减小结构的加速度和位移反应、提高居住者的舒适度方面,具有较好的效果;而在大震和飓风等灾害作用下,这些控制措施在保证结构安全性、使结构不破坏方面,效果却不理想。③ 控制系统要求比结构具有更高的可靠性,从而使造价大大提高,等等。

(5) 基于性能的抗震设计。如前所述,现代地震灾害引起巨大经济损失的新特点,引起世界各国地震工程界对现有抗震设计思想和方法进行深刻的反思,人们认识到必须从以往只注重结构安全,向全面注重结构的性能、安全及经济等诸多方面发展;另一方面,高新技术的发展和人类生活质量的不断提高,使业主和使用者对建筑结构有了越来越多的性能要求,比如安全性、舒适性、经济性和易维护性等;建筑结构技术的飞速进步以及新的建筑材料、结构体系和设计方法的进一步发展,使得许多不同的建筑目标性能能够得以实现,因此有必要从性能的观点对现有抗震设计思想和方法进行反思,而基于性能的抗震设计就是在这种背景下提出的^[1~5]。

1.2 基于性能的结构抗震设计

1.2.1 基于性能的抗震设计思想

目前各国抗震规范中普遍采用的“小震不坏、中震可修、大震不倒”设防水准,被认为是目前处理地震作用高度不确定性的最科学合理的对策,这种设计思想在

实践中也已取得巨大的成功。事实上,在发达国家和地区,即使在人口高度密集的城市周边区域,由于绝大多数建筑物按现行的抗震规范设计或加固,重大地震灾害造成的人员伤亡已经明显下降,然而这种设计思想是以保障生命安全为主要设防目标的,尽管它可以做到大震时主体结构不倒以保障生命安全,但它可能导致中小震下结构正常使用功能的丧失而引起巨大的经济损失。特别是随着经济的发展,结构物内的装修、非结构构件、信息技术装备等的费用往往大大超过结构物的费用,这种损失会更加严重。

例如,我国目前抗震规范 GB50011-2001 采取了“三个水准、两个阶段”的设计^[6],即“小震不坏、中震可修、大震不倒”,并分别通过小震下的截面强度验算、大震下的薄弱层变形验算来实现小震和大震下的设计水准,而“中震可修”的要求则主要采用构造措施来满足,没有具体计算量化;例如怎样的破坏才算可修,中震允许产生多大的破坏,这些破坏对结构物或结构内部的设备、装修有什么影响,等等。从这个角度看,现行规范的这些规定注意了在大震下保障生命安全,但对如何避免地震破坏造成的巨大经济损失是没有足够注意的。这些规定对有些结构是远远不够的,近年来的几次大地震尽管人员伤亡不是很大,但经济损失往往是巨大的,这一事实是基于性能的抗震设计的出发点。

另外,目前的抗震设计中还存在以下局限性^[5]:

首先,设计阶段建筑的抗震性能并不明确。目前的抗震设计只是按照规范给出的步骤进行,很少对结构在地震作用下的有关性能进行评估,因为没有对要求的性能进行明确规定。

其次,业主和使用者很难了解建筑的抗震性能,因为没有人向业主和使用者进行说明。这样有时会引起误解,比如,工程师对建筑性能的期望是大震不倒,而业主对建筑性能的期望则可能是大震下建筑内财产不受损害。而建筑结构作为一种商品,业主和使用者有权知道它的实际性能。

第三,建筑结构的抗震性能没有用来进行经济评估。投资-效益准则作为平衡造价与性能的一个重要原则,在其他工业领域得到了广泛应用,而在建筑结构却很少应用,其主要原因在于建筑结构的性能没有清晰明确,所以业主无法了解在付出一定的投资后能得到怎样的效益。建筑结构有着不同于其他批量生产的工业产品的特点,大部分建筑结构都是惟一的,业主很难在决定购买之前去使用或检验建筑的实际性能。

基于性能的抗震设计思想是 20 世纪 90 年代初由美国学者提出,它是使设计出的结构在未来的地震灾害下能够维持所要求的性能水平。投资-效益准则和建筑结构目标性能的“个性”化是基于性能的抗震设计的重要思想。基于性能的设计克服了目前抗震设计规范的局限性。在基于性能的设计中,明确规定了建筑的性能要求,而且可以用不同的方法和手段去实现这些性能要求,这样可以使新材料、新结构体系、新的设计方法等更容易得到应用。而目前广泛采用的建筑结构常规设计方

法实际上是基于规范准则,而不是基于性能准则,即目前的常规设计是完全按照规范的要求进行的,没有明确建筑结构的实际性能水平。图 1.1 从目标性能的确定、设计方法和检验方法的选取和最后实现的性能水平等方面,对常规设计和基于性能的设计过程做了对比^[5]。

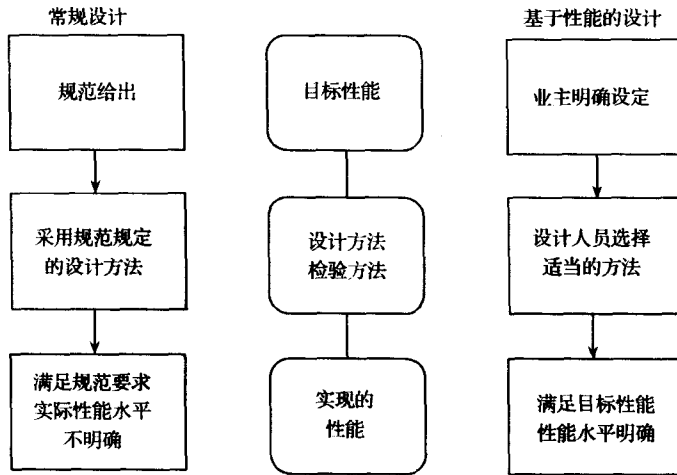


图 1.1 常规设计和基于性能的设计过程的对比

1.2.2 基于性能的抗震设计研究内容

首先对涉及到性能设计的几个概念做简单说明^[7]:基于性能的工程 PBE(Performance Based Engineering)、基于性能的地震工程 PBEE(Performance Based Seismic Engineering)和基于性能的抗震设计 PBSO(Performance Based Seismic Design)。

基于性能的工程 PBE 是从最初的工程结构方案概念设计开始,一直贯穿结构整个寿命周期的一个过程,包括设计准则和结构体系布局的合理选取、结构和非结构构件及设备的确定和具体设计、施工质量的保证和控制、结构使用寿命周期中的维护(以保证结构在各种可能的灾害下,维持所要求的性能水准)等。

基于性能的地震工程 PBEE 则是基于性能的工程应用于地震工程领域,它包括了结构的整个设计、施工和监测维护过程,以保证结构在不同强度的地震作用下能维持所要求的性能水平。

Krawinkler 从过程、概念和需要的主要内容三个方面,总结了基于性能的地震工程的整体框架,包括了地震学、地质学、结构、建筑、非结构及社会经济等方面的内容^[8],如图 1.2 所示。

基于性能的抗震设计 PBSO 是基于性能的地震工程的一部分内容(设计过程),它包括了地震风险水平的确定、性能水平和目标性能的选择、适宜场地的确

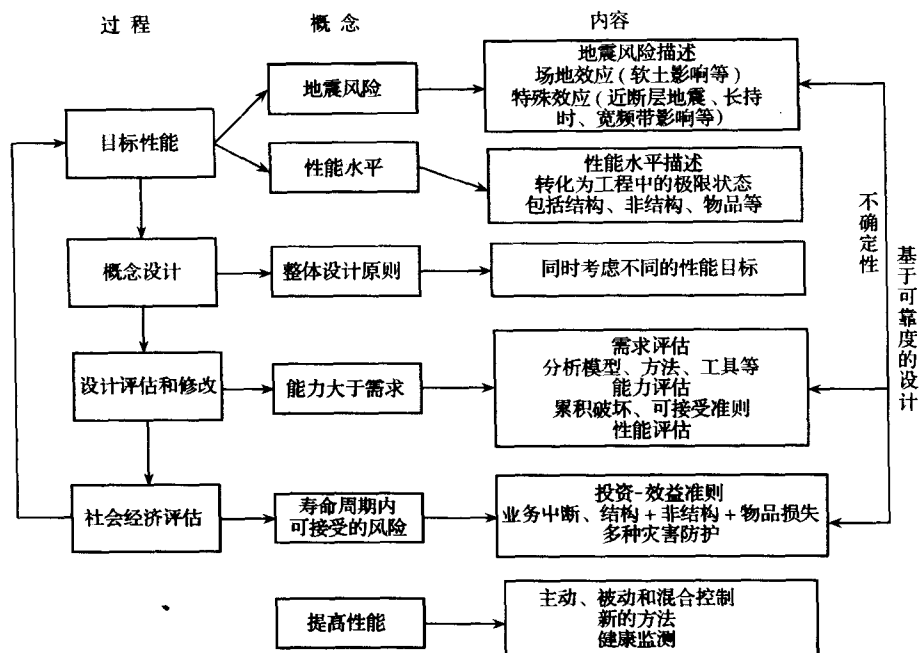


图 1.2 基于性能的地震工程整体框架

定、概念设计、初步设计、最终设计、设计过程中的可行性检查、设计审核以及结构施工中的质量保证和使用过程中的检测维护的细化工作等。

基于性能的抗震设计主要包括三个步骤^[5](图 1.3)：

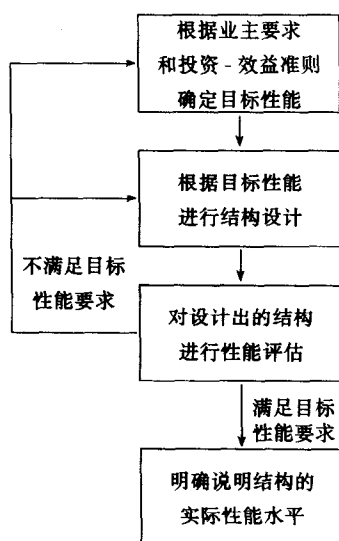


图 1.3 基于性能的抗震设计流程

(1) 根据结构的用途、业主和使用者的特殊要求,采用投资-效益准则,明确建筑结构的目标性能(可以是高出规范要求的“个性化”目标性能)。

(2) 根据以上目标性能,采用适当的结构体系、建筑材料和设计方法等(而不仅仅限于规范规定的方法)进行结构设计。

(3) 对设计出的建筑结构进行性能评估,如果满足性能要求,则明确给出设计结构的实际性能水平,从而使业主和使用者了解(这是区别于目前常规设计的);否则返回第一步和业主共同调整目标性能,或直接返回第二步重新设计。

1.2.3 基于性能的抗震设计研究概况

基于性能的抗震设计代表了未来结构抗震设计的发展方向,引起了各国广泛的重视,美、日等国都投入许多力量进行研究。在美国,由联邦紧急救援署(FEMA)和国家自然科学基金委员会资助,开展了一项为期6年的研究计划,对基于性能的结构抗震设计在未来规范中的应用进行了多方面的研究^[1~4]。该项研究计划包括三个主要项目:应用技术理事会的ATC-33、加利福尼亚州大学 Berkeley 分校地震工程研究中心的EERC-FEMA和加州结构工程师学会的SEAOC Vision 2000。上述项目的研究报告“现有钢筋混凝土建筑的抗震性能评估与加固”(ATC 40)、“NEHRP 建筑抗震加固指南”(FEMA 273)和“基于性能的地震工程”(SEAOC Vision 2000)奠定了基于性能的抗震设计与加固研究的基础。在日本,1995年开始进行了为期3年的“建筑结构的新设计框架开发”研究项目,并在研究报告“基于性能的建筑结构设计”中总结了研究成果^[5]。日本已于2000年6月实行了新的基于性能的建筑基准法(Building Standard Law)。

近年来,基于性能的抗震设计成为国际地震工程领域的一个研究热点,相关研究与应用成果不断发表在一些国际学术期刊和学术会议上^[7~37]。Ghobarah 指出,尽管现行的建筑抗震规范的目标是强调保障生命安全、控制在中小震下结构破坏以及防止在大震下结构倒塌,但设计在满足这些目标的实际可靠度却是不知道的;地震工程界已形成共识,未来的抗震设计应该考虑多种可以量化显式表示的目标性能,并提到了基于性能的设计在被广泛接受之前所面临的一些挑战:目标性能的确定、常规设计方法、地震动的合理模型及结构能力和需求的计算等^[9]。Chandler 和 Lam 综述了基于性能的地震工程所涉及的各个学科领域,包括工程地震与地质学(地震活动规律分析)、工程地震学(地震危险性分析)、土动力学、结构动力学以及材料力学等;指出尽管相关的各个学科本身以及部分交叉学科都已取得了很大成就,然而作为基于性能的地震工程整体中的一环,它们还没有什么相应的改变;说明了现行的一些方法的主要局限性,并寻根溯源及反馈,指出了多学科进一步的关联发展,而这种发展是以前各个学科在各自的领域内不可能单独做到的^[10]。Bertero 简单归纳了基于性能的工程、基于性能的地震工程和基于性能的抗震设计包括的内容,讨论了一个可靠的基于性能的抗震设计所应满足的要求以及一些现