

大连理工大学学术研究丛书

生命线地震工程导论

Introduction to Lifeline Earthquake Engineering

柳春光 林皋 李宏男 周晶◎著



大连理工大学出版社

Dalian University of Technology Press

大连理工大学学术研究丛书

生命线地震工程导论

柳春光 林 皋 李宏男 周 晶 著

大连理工大学出版社

© 柳春光 林皋 李宏男 周晶 2005

图书在版编目(CIP)数据

生命线地震工程导论 / 柳春光, 林皋, 李宏男, 周晶著. —大连: 大连理工大学出版社, 2005. 12

大连理工大学学术研究丛书

ISBN 7-5611-2927-0

I. 生… II. ①柳… ②林… ③李… ④周… III. 生命线系统工程: 地震工程—概论 IV. ①P315.9 ②TU984.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 156947 号

大连理工大学出版社出版

地址: 大连市软件园路 80 号 邮政编码: 116023

发行: 0411-84708842 邮购: 0411-84703636 传真: 0411-84701466

E-mail: dutp@mail.dlptt.ln.cn URL: <http://www.dutp.cn>

大连海事大学印刷厂印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸: 140mm × 203mm 印张: 12.75 字数: 318 千字

印数: 1 ~ 3 000

2005 年 12 月第 1 版 2005 年 12 月第 1 次印刷

责任编辑: 汪会武

责任校对: 林 丽

封面设计: 孙宝福

定 价: 50.00 元

本书由

大 连 市 人 民 政 府 资助出版
大连理工大学学术著作出版基金

The published book is sponsored by

**The Dalian Municipal Government
and**

**The Publishing Academic Works
Foundation of the Dalian Univer-
sity of Technology**

前 言

在自然界的灾害中,地震给城市基础设施、构筑物以及人们的生活和生产带来的损失是巨大的。因此,对城市基础设施和构筑物(即生命线地震工程)进行抗震设计与分析是十分必要的。

生命线地震工程系统是指交通、通信、能源(供电、供气等)、供(排)水等工程系统,是城市基础设施的主要组成部分。生命线工程系统一旦遭到地震破坏,后果将十分严重,将给城市的各项活动的正常运转带来极大的障碍,轻者影响人民的正常生活和工业生产,重者会造成城市的瘫痪。20 世纪发生的多次较大的破坏性地震,都有生命线工程破坏造成严重影响的具体实例。震害表明,现代化城市生命线工程的破坏所造成的影响远远大于一般工程结构和建筑物破坏造成的影响,因此,生命线工程抗震问题是城市防震减灾工作中非常重要的一项研究工作。

从 1971 年美国圣费尔南多地震开始,生命线地震工程的抗震问题受到了各国学者们的极大关注,已成为大中城市防震减灾研究的重要课题之一,并取得了颇丰的研究成果。目前,国内外有关生命线地震工程方面的参考书非常少。1994 年曾由赵成刚等人编写了《生命线地震工程》一书,本人也有幸参加了该书的编写工作。但近几年来,随着现代化技术和计算机技术的迅猛发展以及这方面的研究成果越来越多,国内外城市破坏性地震的频繁发生和我国国民经济建设的飞速发展,对生命线工程系统抗震研究又提出了新的挑战。生命线地震工程的内涵和外延也在不断扩大,出现了

各种各样的生命线工程系统,为此,著者和其他学者均认为,有必要将目前生命线地震工程的研究内容、特点以及新的研究进展和研究成果介绍给大家,这也是本书编写的初衷。

作为现代化功能的城市,将更依赖于生命线地震工程系统的工作情况。生命线地震工程系统的复杂性、网络性、广泛性、重要性以及以系统的整体网络形式发挥功能的特点,使得生命线地震工程的抗震分析不仅需要研究那些易受地震影响的系统单元的抗震性能,而且需要研究单个生命线工程系统和复合生命线工程系统在地震作用下的地震行为以及功能的损失情况等。

本书结合国内外生命线地震工程研究的最新进展,力求把目前这方面的最新研究成果编入在内。为此,本书侧重于生命线地震工程的功能损失和性态设计等方面的研究问题,努力做到全面、系统地介绍国内外生命线地震工程研究的现状、特点以及研究内容。本书在总结生命线地震工程研究内容的基础上,分别介绍了生命线工程系统的四大子系统的抗震问题以及功能损失问题,其中包括一些系统主要结构物的抗震问题,同时还介绍了生命线工程系统的经济损失分析方法以及复合生命线系统的地震响应问题。但由于篇幅的关系,对于有些问题不能进行详细的推导,本书只是作了简单的介绍。本书共分 16 章,第 1 章介绍了生命线地震工程的研究特点、内容及进展;第 2 章介绍了一种简单的生命线地震工程系统地震动参数的分析方法;第 3~6 章介绍了交通系统(包括桥梁结构等)的抗震性能及功能失效问题;第 7~9 章介绍了能源系统(包括输电塔结构)的抗震性能及功能失效问题;第 10、11 章介绍了供水系统(包括管道结构)的抗震性能及功能失效问题;第 12 章介绍了通信系统(包括通信塔结构等)的抗震性能及功能失效问题;第 13 章介绍了大坝结构的抗震性能问题;第 14、15 章介绍了生命线工程系统的经济损失分析方法以及复合生命线工程系统的地震响应问题;第 16 章介绍了高新技术在生命线工程系统中的应

用。

本书提供了一本全面、系统、正确地理解和学习生命线地震工程研究特点、研究内容、理论基础知识和实际应用的参考书,可供从事土木、建筑、防灾专业的工程技术人员,高等学校的学生以及研究生参考使用。

本书总体构思与安排由柳春光、林皋完成。第1~8,10,12,14~16章由柳春光撰写;第9章由李宏男撰写;第11章由周晶撰写;第13章由林皋撰写。柳春光、林皋担任最后统稿及定稿工作。

由于时间限制以及作者的学识有限,书中疏漏和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

感谢被引用文献的作者们,感谢国家自然科学基金的资助,感谢大连市学术著作出版基金的资助,感谢大连理工大学出版社的支持。

柳春光

2005年3月于大连理工大学

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 地震工程理论研究回顾	2
1.3 生命线地震工程构成	5
1.4 生命线地震工程特点	7
1.5 生命线地震工程研究现状.....	10
1.6 生命线地震工程抗震设防原则.....	13
1.7 生命线地震工程研究内容.....	14
第 2 章 场地地震危险性评价	18
2.1 引言.....	18
2.2 地震及地震波.....	19
2.3 地震动的确定方法.....	23
2.4 设定地震分析.....	24
2.5 场地地震动参数的确定.....	25
第 3 章 交通系统概况	32
3.1 引言.....	32
3.2 桥梁结构.....	34
3.3 隧道结构.....	51
3.4 铁路系统.....	52
3.5 航空运输系统.....	55

3.6	水运系统	55
第4章	梁式桥结构地震可靠性分析	60
4.1	引言	60
4.2	结构可靠性分析方法	62
4.3	桥墩构件可靠性分析	69
4.4	算例分析	71
4.5	桥梁上部结构可靠性分析	72
4.6	梁式桥结构系统可靠性分析	84
4.7	算例分析	85
4.8	多点非一致激励下桥梁结构的可靠性分析	86
第5章	桥梁结构抗震性能评价	88
5.1	引言	88
5.2	Pushover 方法的分析原理	90
5.3	Pushover 方法的分析内容	91
5.4	能力谱方法	93
5.5	地震需求谱的建立	98
5.6	桥梁结构的抗震性能评价	105
5.7	算例分析	114
第6章	交通系统功能失效分析	116
6.1	引言	116
6.2	交通系统震害	116
6.3	网络系统可靠性分析方法	119
6.4	交通系统可靠性分析	124
6.5	交通系统地震服务功能决策分析	130
6.6	交通系统智能决策分析方法	142
第7章	能源供应系统	149
7.1	引言	149

7.2	供气系统	150
7.3	燃料供应系统	152
7.4	供电系统	155
7.5	电气设备地震易损性分析	164
7.6	能源系统地震应急反应及抗震措施	172
第 8 章	供电系统功能失效分析	180
8.1	引言	180
8.2	供电系统分析内容	181
8.3	供电系统分析模型	181
8.4	供电系统潮流分析方法	182
8.5	供电系统功能等级划分	188
8.6	供电系统潮流功能失效分析	189
8.7	供电系统安全性分析	197
8.8	基于灵敏度分析的 DSEA 控制算法	201
第 9 章	输电塔-导线体系的地震反应分析	208
9.1	引言	208
9.2	输电塔-导线体系的特点及分类	210
9.3	输电塔-导线体系的地震反应分析	212
9.4	算例分析	221
9.5	输电塔体系简化抗震设计方法的建议	227
第 10 章	供、排水系统	230
10.1	供水系统	230
10.2	排水系统	234
10.3	架空管线地震反应分析	236
10.4	地下管线地震反应分析方法	239
10.5	管道、油罐地震易损性分析	244
10.6	管道震害评估方法	248

10.7	油罐震害评估方法·····	249
10.8	供水管网系统连通性分析·····	251
10.9	供水系统功能失效分析·····	255
第 11 章	管道地震反应分析 ·····	266
11.1	埋地管道地震反应分析·····	266
11.2	海底悬跨管道地震反应分析·····	273
11.3	埋地管道震害预测方法·····	287
第 12 章	通信系统 ·····	292
12.1	引言·····	292
12.2	有线通信·····	293
12.3	无线通信·····	295
12.4	通信系统震害·····	298
12.5	通信系统抗震对策分析·····	300
12.6	通信塔的地震反应分析·····	302
第 13 章	水坝 ·····	306
13.1	引言·····	306
13.2	土石坝·····	308
13.3	重力坝·····	326
13.4	拱坝·····	341
第 14 章	生命线工程系统损失分析 ·····	362
14.1	引言·····	362
14.2	生命线工程系统受灾程度分析·····	365
14.3	生命线工程系统经济损失分析·····	365
14.4	生命线工程系统恢复决策分析·····	369
第 15 章	复合生命线工程系统 ·····	371
15.1	引言·····	371
15.2	复合生命线工程系统震后恢复策略·····	374

15.3	生命线工程系统的地震规范研究.....	374
15.4	复合生命线工程系统相互作用分析.....	375
第 16 章	高新技术在生命线地震工程中的应用	377
16.1	引言.....	377
16.2	地理信息系统(GIS)	379
16.3	生命线工程系统防震减灾计算机管理系统分析	381
16.4	生命线工程系统防震减灾功能模块分析.....	382
参考文献		384

第 1 章 绪论

1.1 引言

地震是危及人民生命财产的最为严重的突发性自然灾害,对人类社会的危害主要有三个方面:一是造成结构物破坏、人员伤亡、经济损失以及次生灾害;二是破坏人类赖以生存的环境;三是影响人类社会的正常运行秩序。

我国是世界上破坏性地震发生频繁和震害损失惨重的国家之一,无论在历史上还是在最近几十年内,我国的地震灾害在世界上均居首位。据观测资料,我国在 1900 年至 1990 年间,共发生破坏性地震 715 次,死亡人数达 60 余万人,受伤者不计其数,经济损失惨重。例如,1976 年 7 月 28 日,在拥有 150 万人口的唐山市,遭遇 7.8 级地震的袭击,顷刻间,整座城市化为一片瓦砾,人员伤亡近 25 万人,经济损失超过百亿元,并造成无法估量的社会心理创伤。目前,随着社会主义现代化程度的提高,人口的增加和密集,地震带来的人员伤亡和经济损失也日趋严重。例如,1995 年 1 月 17 日发生在日本阪神地区的地震,震级 7.2,只能算是一个中等强度的地震,却造成了 5500 人死亡和 1000 亿美元的经济损失。地震一方面造成人类生命财产损失、人类生存环境的破坏,另一方面亦给予人们在抗御这一突发性自然灾害中以教训,给人类提供了宝贵的知识和经验。为了减轻地震灾害的损失,人类在生存和发展中,逐步认识地震对人类社会的作用,探讨抵御地震影响的对策,从而形成和发展了地震工程学。

地震还是一个社会问题,因为就一个地区而言,尽管破坏性地震的年发生概率很低,但导致不利社会后果(经济损失、人员伤亡、结构破坏和功能失效)的概率不一定很低,它可以引起地震动、液化、侧向移动、滑坡、地表破裂、区域构造变形以及海滨地区海啸波涛等。

随着社会的进步,特别是城市的发展和地震震害经验的增加,促使人们对交通、通信、水利、能源和管道工程的抗震问题给予更多的关注,从而产生了生命线地震工程的研究。生命线工程系统抗震问题的研究从1971年圣费尔南多地震开始,受到了各国学者们的极大关注,已成为大中城市防震减灾研究的重要课题之一,目前取得了颇丰的研究成果。

1.2 地震工程理论研究回顾

地震给结构物造成了严重的破坏,也给人们的生活带来了巨大的损失。减少地震造成的经济损失是人们面临的重要课题,结构、构件抗震问题的研究显得十分重要。

结构的地震反应决定于地震动和结构特性,特别是动力特性,因此,地震反应分析的水平也是随着人们对这两方面认识的深入而提高的。前期研究主要是对地震动的谱成分和结构的非弹性性能的深入认识,近期更进而认识了地震活动性与地震动的不确定性和结构的不同破坏阶段。

地震力理论也称地震作用理论,它研究地震时地面运动对结构物产生的动态效应。结构地震反应分析的发展阶段可以分为静力、反应谱、动力三个阶段。动力阶段又可分为弹性与非弹性(或非线性)两个阶段,随机振动与确定性分析是这一阶段中并列出现的两种分析方法。

(1) 静力阶段,1900年前后,日本学者大森房吉、佐野利器、

物部长穗、末广恭二等对其发展做出了重要贡献。大森房吉 1900 年提出其地震烈度表,用静力等效水平最大加速度作为地震烈度的绝对指标,结构物所受的地震荷载可以写为下列形式:

$$P = \frac{W}{g} \times a_{\max} = KW$$

式中, W 为物体重量; K 为地震系数,日本称为工程震度或工程烈度; $a_{\max}$ 为地面运动加速度峰值。这一公式的物理意义是:结构物是刚体,其最大加速度就等于地震动最大加速度。

(2) 反应谱阶段,日本学者早在 1920 年前后,就研究结构物在简谐振动下的地震反应,只是由于对地震特性缺乏量的了解,所以,虽然有许多进展,仍未能使地震反应分析脱离静力阶段。这种现象一直延续到 20 世纪 40 年代,直到比奥特、贝尼奥夫、豪斯纳等人在取得了强地震动记录之后,才提出了反应谱这样一个简化了的概念。这一理论既考虑了结构动力特性与地震特性之间的动力关系,又保持了原有的静力理论形式。对于可以简化为单自由度的结构物,其所受的最大等效地震荷载为

$$P = cK\beta(T, \xi)W$$

式中, $\beta(T, \xi)$ 为加速度反应谱与地震动最大加速度之比,称为动力放大系数,是结构固有周期 T 和阻尼比 ξ (通常取为 5%) 的函数; K, W 同上; c 为结构系数或综合影响系数。

$$\beta(T, \xi) = \frac{S_a(T, \xi)}{a}$$

(3) 随机振动,早在 1947 年,豪斯纳(Housner)首先把地震动看做随机过程,但中间停顿了近 10 年,直到 20 世纪 50 年代后期,地震工程界才广泛开展地震反应的随机过程研究。有代表性的研究者包括罗森布卢思(Rosenblueth, 1956)、汤姆森(Thomson, 1959)、埃林根(Eringen, 1958)、巴尔斯坦(1958)、博洛京(1960)、和田治见宏(1958)等。这一分析方法的特点在于,它认为地震动

结构地震反应都是随机现象,因而只能求得其统计特征,或者具有出现概率意义上的最大反应。根据这一概念,较好地处理了反应谱分析方法中的振型组合问题,并使抗震设计从安全系数法过渡到概率理论的分部系数法。这一理论是与反应谱理论并行的,前者从随机观点,处理了反应超过给定值的概率,后者从确定性概念,处理了复杂频谱组成的地震动引起的结构反应。

(4)结构地震反应的数值方法分析。随着20世纪60年代前后电子计算机的大量普及而兴起的结构反应数值分析以及强震观测记录和震害经验的积累,人们逐步认识到像反应谱那样的等效静力法,并不足以保证结构物的抗震安全,考虑全部地震动过程,进行真正的结构反应动力分析是非常必要的。1959年,纽马克提出了通用的逐步积分的数值法,不但可以直接求得微分方程的积分,也可以用于多自由度体系的非线性地震反应的积分。其物理概念清晰,经过国内外大量应用,其计算时间、精度与稳定性都是令人满意的。1966年,威尔逊(Wilson, 1966)提出其 θ 法;纽马克等(Newmark and Rosenblueth, 1971)曾将反应谱推广为非线性反应谱。

总之,静力阶段的结构地震反应分析以弹性为主,只考虑地震动过程中的最大振幅,反应谱的前期仍然以弹性分析为主,到后期才考虑结构的非弹性性质,主要的贡献是考虑了地震动过程中的振幅与频谱。

目前,结构抗震已从“被动”抗震阶段发展为“控制”和“性能”抗震阶段。其中,结构的非线性、材料的本构关系、健康诊断、多种计算方法的产生、生命线地震工程的网络可靠性及功能失效分析方法、其他相关学科的渗透等,都是现阶段的主要研究内容。强震观测、仪器研制、振动测试、实验研究等,也是这一阶段的主要研究方面。

1.3 生命线地震工程构成

从日本 1923 年 Kanto 地震开始,人们认识到地震设计是有用的,地面运动强度的影响是重要的,这一阶段可以称为“结构地震工程”(Structural Earthquake Engineering)。生命线地震工程(Lifeline Earthquake Engineering)的诞生被认为是在 1971 年 2 月 9 日美国发生圣费尔南多(San Fernando)地震之后,由美国加利福尼亚大学的 Duke 教授考察了灾区的电力、煤气、给排水、交通和通信等系统后,提出了生命线(Lifeline)和生命线地震工程的概念。1975 年在美国召开的地震工程国际会议上,他发表了题为“生命线地震工程评价指南”的学术论文,进一步阐述了生命线、生命线地震工程及其评价方法,并且在他(Duke and Moran, 1975 年)领导下,美国土木工程学会(ASCE)设立了生命线地震工程技术委员会(Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, TCLEE),这是世界上第一个关于生命线地震工程的学术性组织。1995 年,该委员会组织出版了专著“北岭地震生命线特性与震后响应”(Northridge Earthquake Lifeline Performance and Post-Earthquake Response),比较详细地介绍了美国北岭地震生命线的震害特性与震后恢复。日本学者自发地响应,并于 1976 年在东京举办了第一届美国—日本生命线地震工程研讨会。日本是严重地震灾害的多发国,而且全国半数以上的人口集中在城市,因此比较重视城市生命线地震工程的研究与实践工作,1991 年和 1998 年,编辑出版了《生命线地震工程》、《地震与城市生命线一系统的诊断与恢复》等专著。另外,在我国对生命线地震工程产生重大影响的地震——1976 年唐山大地震,不仅加速了我国生命线地震工程的基础研究,而且产生了主要的生命线工程系统分支,如供水系统、供电系统、供气系统、通信系统和交通系统。唐山地震