

地震工程学

与工程场地地震安全性评价

EARTHQUAKE ENGINEERING
AND SEISMIC SAFETY EVALUATION
OF ENGINEERING SITES

孙鸿玲 / 著



四川大学出版社

地震工程学

与工程场地地震安全性评价

EARTHQUAKE ENGINEERING
AND SEISMIC SAFETY EVALUATION
OF ENGINEERING SITES

孙鸿玲 / 著



四川大学出版社

责任编辑:毕 潜
责任校对:龚娇梅
封面设计:墨创文化
责任印制:王 炜

图书在版编目(CIP)数据

地震工程学与工程场地地震安全性评价 / 孙鸿玲著.
—成都:四川大学出版社, 2018.9
ISBN 978-7-5690-2369-5

I. ①地… II. ①孙… III. ①工程地震—研究②地震
危险区—安全评价 IV. ①P315.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 210878 号

书名 地震工程学与工程场地地震安全性评价
DIZHEN GONGCHENGXUE YU GONGCHENG CHANGDI DIZHEN ANQUANXING PINGJIA

著 者 孙鸿玲
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行 四川大学出版社
书 号 ISBN 978-7-5690-2369-5
印 刷 郫县犀浦印刷厂
成品尺寸 185 mm×260 mm
印 张 17.5
字 数 445 千字
版 次 2018 年 12 月第 1 版
印 次 2018 年 12 月第 1 次印刷
定 价 76.00 元



- ◆ 读者邮购本书, 请与本社发行科联系。
电话: (028)85408408/(028)85401670/
(028)85408023 邮政编码: 610065
- ◆ 本社图书如有印装质量问题, 请
寄回出版社调换。
- ◆ 网址: <http://press.scu.edu.cn>

版权所有◆侵权必究

目 录

第 1 章 概 论	(1)
1.1 前言	(1)
1.2 地震工程学的基本内容	(6)
1.3 地震工程学发展简史	(10)
第 2 章 地震学基础知识	(14)
2.1 地震学的起源	(14)
2.2 地球内部构造	(25)
2.3 板块构造运动	(28)
2.4 板内构造活动与板内地震	(35)
2.5 地震成因与地震类型	(37)
2.6 震源机制与断层	(42)
2.7 地震活动性	(44)
2.8 地震波	(46)
2.9 地震的仪器观测与震级	(62)
2.10 地震预报	(67)
第 3 章 地震灾害	(72)
3.1 地震灾害概述	(72)
3.2 国外地震震害实例	(76)
3.3 中国的大地震与震害	(88)
第 4 章 地震烈度	(109)
4.1 地震的宏观现象	(109)
4.2 地震烈度与地震烈度表	(121)
4.3 地震烈度的性质及其适用性	(129)
4.4 地震烈度分布	(132)
4.5 地震烈度的衰减规律	(139)
4.6 震害指数	(148)
第 5 章 中国的地震	(155)
5.1 中国地震构造运动背景	(155)
5.2 中国的地震区和地震带	(170)

5.3	中国地震的基本特征	(181)
5.4	中国的地震活动性	(182)
第6章	地震危险性、危害性分析和地震区划	(186)
6.1	地震活动性分析	(187)
6.2	地震危险性分析	(192)
6.3	结构易损性与地震危害性分析	(209)
6.4	地震区划	(220)
6.5	地震小区划	(226)
第7章	重大工程场地地震安全性评价	(231)
7.1	概述	(231)
7.2	区域地震活动性和地震构造评价	(234)
7.3	近场区地震活动性和地震构造评价	(239)
7.4	工程场地地震工程地质条件勘测	(245)
7.5	地震动预测方程确定	(247)
7.6	确定性方法震源模型	(248)
7.7	概率地震危险性评价	(250)
7.8	场地地震动参数确定	(260)
7.9	场地地震地质灾害评价	(264)
7.10	工程抗震设防(概率)水准	(267)

第1章 概 论

1.1 前言

地震又称地动、地振动，是地壳快速释放能量过程中造成的振动，期间会产生地震波的一种自然现象。地球上板块与板块之间相互挤压碰撞，造成板块边沿及板块内部产生错动和破裂，是引起地震的主要原因。地震开始发生的地点称为震源，震源正上方的地面称为震中。破坏性地震的地面振动最烈处称为极震区，极震区往往也就是震中所在的地区。据统计，地球上每年会发生 500 多万次地震，即每天要发生上万次地震。其中绝大多数太小或太远，以至于人们感觉不到，真正能对人类造成严重危害的地震有 10~20 次，能造成特别严重灾害的地震有一两次。

地震常常造成严重人员伤亡，能引起火灾、水灾、有毒气体泄漏、细菌及放射性物质扩散，还可能造成海啸、滑坡、崩塌、地裂缝等次生灾害。我国的官方数据显示，在 1556 年 1 月 23 日袭击陕西省的地震中，有 83 万人死于地震及由地震引起的其他灾害。1906 年美国旧金山地震、1923 年日本关东地震、1995 年日本阪神地震等都引发大火，关东地震中死亡 14 万人，其中约 10 万人因火灾死亡。地震已是人类面临的主要自然灾害之一，在过去的 20 世纪里，因地震死亡的人数平均每年达到 17000 人，即使不包括唐山地震的人员伤亡，平均死亡人数也达到 10000 人/年。

由于城市化进程的加快，地震灾害造成的经济损失和保险损失增长迅速，地震往往给一些国家的经济带来巨大破坏。例如，1985 年墨西哥地震造成了 40 亿美元的损失，1989 年发生在美国加州中部的中等大小的洛马普瑞特地震则造成了 60 亿美元的损失。更惊人的是 1988 年的亚美尼亚地震，几个大的工业区和城市都被摧毁，整个国家经济濒临崩溃。这次地震造成的经济损失达到 160 亿美元。1995 年阪神地震造成 1000 亿美元的损失，预示着如果地震发生在东京、洛杉矶、旧金山等其他更大的城市，损失会更大。2008 年我国“5·12”汶川地震造成的直接经济损失高达 8451 亿元人民币。

表 1.1.1 和表 1.1.2 中列出了 20 世纪和 21 世纪主要地震及其引起的人身伤亡情况。除了人身伤亡外，地震所带来的损失还有房屋破坏，交通生产中断，水、火、疾病等次生灾害，社会与政治影响。

我国是一个多震灾的国家，地震频度高、强度大、分布广。百年来的资料表明，中国平均 5 年左右就会发生 1 次 7 级以上地震，平均 10 年左右就会发生 1 次 8 级以上地震。地震区域广阔而分散，地震频繁而强烈，在 20 世纪内，震级等于或大于 8 的强地震已经

发生了9次之多(见表1.1.3),1976年河北唐山地震,震级近8级,死亡达24万余人,强震区内的房屋、工业厂房与设备、城市建设、交通运输、水电设施等都受到极其严重的破坏。

为了减轻地震灾害,必须大力进行地震预报与地震工程两方面的工作。预报的目的是力图正确地指出今后可能发生强地震的地点、时间和大小,使政府和人民得以采取相应的措施,防止或减少损失。总的来说,地震预报可以分为两大类:一类是长期预报,为抗震或地震工程服务;另一类是中期、短期和临震预报,为发出警报以减轻灾害服务。中期预报指的是对今后一两年至几年内的地震趋势进行分析,为进一步加强监视指出方向;短期预报指的是几天至几个月内的预报;临震预报则指几小时至几天内的预报。短期与临震预报主要服务于政府和人民为减轻生命财产损失采取的临时性措施。对于长期预报的地震,人们可以作出地震区划,尽量选择较安全的地区建设城市、规划居民点,对于不同强烈程度的地震区,规定不同要求,制订抗震规范,据以兴建新工程,加固已有工程。对于短期预报,可以疏散人口,加强防震救灾准备,对特别危险或重要的工程,采取应急措施,保护人民生命,减少财产损失。

表 1.1.1 20 世纪部分强震死亡人数

时间	地点	里氏震级	死亡人数(人)	时间	地点	里氏震级	死亡人数(人)
1905年4月4日	克什米尔	8.6	1.9万	1964年6月16日	日本新泻	7.4	26
1906年4月18日	美国旧金山	8.3	7万余	1970年5月31日	秘鲁北部	7.7	7万
1906年8月16日	智利瓦尔帕莱索	8.6	2万	1971年2月9日	美国加州	6.6	65
1920年12月16日	中国海原	8.6	23.4万	1972年4月10日	伊朗	7.0	1.7万
1923年9月1日	日本关东	8.3	10万死,4万不明	1972年12月23日	马拉瓜	6.5	1万
1927年3月7日	日本丹后	7.9	3000	1975年2月4日	中国海城	7.0	1300
1933年3月2日	日本三陆冲	8.9	3000	1976年2月4日	危地马拉	7.5	22778
1935年5月30日	巴基斯坦	7.5	3万	1976年7月28日	中国唐山	7.6	24万
1939年1月25日	智利齐康	8.3	2.8万	1978年9月16日	伊朗东北部	7.7	205万
1939年12月26日	土耳其	7.9	2.3万	1985年9月15日	墨西哥北部	8.1	9500余
1946年12月20日	日本南海道冲	8.4	千余	1988年12月7日	亚美尼亚西北	6.9	2.5万
1948年6月28日	日本福井	7.3	千余	1990年6月21日	伊朗西北	7.3-7.7	5万
1952年7月21日	美国加州	7.7	10	1997年5月10日	伊朗北部	7.1	1500
1960年2月29日	摩洛哥	5.6	1.2万	1998年2月4日	阿富汗东北部	6.1	5000
1960年5月22日	智利	8.3	海啸死亡120	1999年1月25日	哥伦比亚西部	6.0	1171
1964年3月28日	美国阿拉斯加	7.9	130	1999年8月17日	土耳其伊兹密特	7.4	17118

表 1.1.2 中国 1900 年后 $M \geq 7$ 的地震

时间	地点	里氏 震级 M	震中 烈度 I_0	伤亡与震害
1902 年 8 月 22 日	新疆阿图什	$8 \frac{1}{4}$	$> X$	死伤 500 人, 土房全倒
1906 年 12 月 23 日	新疆玛纳斯西南	8	X	死 280 人, 房倒 2000 余间
1909 年 4 月 15 日	台湾花莲海中	$7 \frac{1}{4}$	VII	
1914 年 8 月 5 日	新疆巴里坤	$7 \frac{1}{2}$	$> VII$	
1915 年 12 月 3 日	西藏拉萨东	7		
1917 年 7 月 31 日	吉林珲春南	$7 \frac{1}{2}$		深震
1918 年 2 月 13 日	广东南澳	$7 \frac{1}{4}$	X	死伤 80%, 全县房倒平
1918 年 4 月 10 日	吉林珲春	$7 \frac{1}{4}$		深震
1919 年 12 月 21 日	台湾台东东北海中	7		
1920 年 6 月 5 日	台湾花莲海外	8		死伤数十人
1920 年 12 月 16 日	宁夏海原	$8 \frac{1}{2}$	XII	死 28.82 万人, 约 30 万人受伤, 旧城全毁
1920 年 12 月 25 日	宁夏泾源	7		
1922 年 9 月 2 日	台湾宜兰东南海中	$7 \frac{1}{2}$		死数人, 房倒 14 户
1922 年 9 月 15 日	台湾宜兰东南	$7 \frac{1}{4}$		伤数人, 房倒 24 户
1923 年 3 月 24 日	四川炉霍、道孚	$7 \frac{1}{4}$	X	死 3000 余人, 震区房全倒
1924 年 7 月 3 日	新疆民丰东	$7 \frac{1}{4}$		
1925 年 3 月 16 日	云南大理	7	IX	大理县死 3800 人, 震后起火, 共毁房 7 万余间
1925 年 4 月 17 日	台湾恒春	7		
1927 年 5 月 23 日	甘肃古浪	8	XI	死 4000 余人, 房倒 90%
1930 年 8 月 21 日	台湾宜兰东南海中	7		
1931 年 8 月 11 日	新疆富蕴	8	XI	死 4 万人, 房屋倒, 地裂 300 千米
1932 年 12 月 25 日	甘肃昌马	$7 \frac{1}{2}$	X	死 7 万人, 房倒 80%~90%
1933 年 8 月 25 日	四川叠溪	$7 \frac{1}{4}$	X	死 6800 人, 水灾死 2500 人, 69 余城房全毁

时间	地点	里氏 震级 M	震中 烈度 I_0	伤亡与震害
1935年4月21日	台湾新竹、台中	7		死3200人, 伤万余人, 房全倒
1935年9月4日	台湾兰屿西北	$7\frac{1}{4}$		
1936年8月22日	台湾恒春东海中	$7\frac{1}{2}$		伤十余人, 房倒15户
1937年8月1日	山东菏泽	7	IX	死390人, 房倒3万余间
1937年12月8日	台湾台东新港	7		桥梁破坏, 房倒5户
1938年9月7日	台湾花莲附近	7		
1938年12月7日	台湾火烧岛北海中	7		
1940年7月10日	黑龙江穆棱	$7\frac{1}{4}$		深震
1941年5月16日	云南耿马	7	IX	死伤数十人
1941年12月16日	台湾嘉义	7	IX~X	死300余人, 房倒1700余间
1941年12月26日	云南澜沧东南	7	VII	
1943年11月24日	台湾火烧岛东	7		
1944年3月10日	新疆库车、新源	$7\frac{1}{4}$	>VII	死数人
1644年9月28日	新疆喀什西南	7		房屋轻度破坏
1946年1月11日	黑龙江牡丹江南	$7\frac{1}{4}$		深震
1947年3月17日	青海达日	$7\frac{3}{4}$		
1947年7月29日	西藏朗县东南	$7\frac{3}{4}$		
1948年3月3日	东沙群岛东南	$7\frac{1}{4}$		
1948年5月25日	四川理塘南	$7\frac{1}{4}$	X	死800余人, 房倒90%
1949年2月24日	新疆库车东北	$7\frac{1}{4}$	IX	死十余人, 房倒近4000间
1950年8月15日	西藏察隅	$8\frac{1}{2}$	$\geq X$	伤亡甚大, 坏房倒90%
1951年10月22日	台湾花莲	$7\frac{1}{4}$	IX~X	
1951年11月18日	西藏当雄	8		
1954年2月11日	甘肃山丹东北	$7\frac{1}{4}$	X	死47人, 房倒20%~30%

时间	地点	里氏 震级 M	震中 烈度 I_0	伤亡与震害
1955年4月14日	四川康定南	$7\frac{1}{2}$	IX	坏房倒90%
1955年4月15日	新疆乌恰西	7	IX	两次地震
1959年8月15日	台湾恒春东北	7		
1963年4月19日	青海阿兰湖	7	VII+	西克尔土坝顶裂
1964年1月18日	台湾台南东南	7	IX~X	
1966年3月22日	河北宁晋 东汪(邢台)	7.2	X	死亡8064人,伤38000人,县城内房几乎倒平
1969年7月18日	渤海	7.4	\geq VII	山东各地倒坏房千余间
1970年1月5日	云南通海	7.7	X+	死亡15621人,房倒90%
1972年1月25日	台湾新港东海中	8		
1973年2月6日	四川炉霍	7.9	X	除木房外,全倒
1974年5月11日	云南永善大关	7.1	IX	死亡1423人,1600余人受伤;损坏房屋6.6万余间,倒塌2.8万余间
1975年2月4日	辽宁海城	7.3	IX	死亡2041人,伤27538人,乡村房倒50%
1976年5月29日	云南龙陵	7.5	IX	两次地震死亡98人,重伤451人,轻伤1991人,房屋倒塌和损坏42万间
1976年7月28日	河北唐山	7.8	XI	死24万人,伤16万人,全市几乎全毁
1976年8月16日	河北唐山	7.1	IX	
1976年8月16日	四川松潘	7.2	VII+	死亡800余人,轻伤600余人
1976年8月22日	四川松潘	7.2	IX	
1988年11月6日	云南澜沧	7.6		伤4105人,死亡743人,经济损失25.11亿元
1988年11月6日	云南耿马	7.2		
1999年9月21日	台湾集集	7.6	VII	死亡2321人,39人失踪,8722人受伤;40845栋房屋全倒,41373栋房屋半倒
2008年5月12日	四川汶川	8	XI	69227人遇难,374643人受伤,17923人失踪,经济损失8451亿元
2010年4月14日	青海玉树	7.1	IX	2698人遇难,270人失踪
2012年4月20日	四川雅安芦山	7	IX	196人死亡,失踪21人,11470人受伤
2014年2月12日	新疆于田	7.3	IX	没有造成人员伤亡
2017年8月8日	四川九寨沟	7	IX	25人死亡,525人受伤

注: I_0 为震中烈度或最高烈度。数据大部分引自科学出版社1983年出版的《中国地震目录》。

地震预报主要是地震和地质工作者的任务，疏散人口和采取防震救灾措施属于社会管理，一般均由政府和地方组织负责。工程建设抗震和加固措施的制订则是地震工程工作者的任务。地震工程工作者还要参加地震危险性估计及区划，制订工程应急措施与估计震害等工作。

表 1.1.3 20 世纪内震级等于或大于 8 的强地震次数及造成死亡人数

国家	死亡人数 (人)	地震次数 (次)	国家	死亡人数 (人)	地震次数 (次)
阿根廷	5100	8	伊朗	7500	29
智利	28000	32	意大利	1800	15
中国	159000	17	日本	15800	35
厄瓦多尔	5500	11	巴基斯坦	40000	5
希腊	1500	47	土耳其	46400	54
印度	6500	6	苏联	15000	2

1.2 地震工程学的基本内容

地震工程学是一个在社会经济可接受的水平上限制地震风险，关注保护社会、自然和人为环境的科学领域。

地震工程学是研究地震动、工程结构地震反应和抗震减灾理论的科学。地震工程学包含从科学与工程的不同分支而来的多学科领域，其目标是把地震危险控制在社会和经济可以接受的水平。

地震工程学的基本内容如图 1.2.1 所示。作为一个优秀的地震工程工作者，无论从事的是工程地震、结构动力分析、抗震设计还是抗震鉴定加固的研究、设计或管理，都需要了解地震工程学各项工作的目的和这些工作的相互联系，了解它们当前的水平，并熟悉自己所从事的那项工作的各个细节，然后才能与其他工作相互衔接，相互配合，更好地完成自己的工作任务。

地震工程学的最终任务：根据地震预报现有结果，预见到城市地区和民用基础设施上强震作用下的潜在后果；在国家经济政策的指导下，经济、安全、合理地规定兴建工程的抗震设防技术措施，设计、建造和维护结构，对已有的工程规定鉴定标准和加固措施，使其在地震作用时达到预期的抗震性能。从任务来看，地震工程学可以根据专业性质和工作阶段分为五个部分，即地震危险性分析与地震区划、抗震规范、抗震设计、抗震鉴定加固和抗震救灾。有了地震长期预报之后，根据预报的未来地震的时间、地点、强度、概率四个要素，对选用的地震动设计参数，估计其大小与发生的概率，即地震危险性，再根据危险性的大小，做出以这些参数为指标的地震动区划。我国现有的地震烈度区划即为一例。这一工作把地震工作者的预报结果转换为工程抗震所需要的参数的预报。抗震规范是指抗震设计中必须遵守对新建工程规定的法定抗震原则和具体措施。这些原则和措施是将人们根据宏观震害总结出来的抗震经验，从强震观测、结构试验与动力分析所了解的抗震原

理，以及工程设计者的工程经验这三方面综合起来的技术成果，是在国家经济政策的指导下制订的综合准则。这里所说的抗震设计包括按抗震规范进行的一般结构物的设计，也包括规范中要求进行专门研究而不受规范约束的一些重要的、特殊的结构物的设计，如核电站、海洋平台、特大桥梁、特大水坝等。对于后者，我们需要利用最新的科研成果和经验，对其抗震安全性进行全面而系统的分析、试验和原型观测等特殊研究。抗震鉴定加固是对已有工程而言的，针对当地未来可能遭遇的地震危险，估计已有工程的危害性，提出加固的原则和可行的技术措施。抗震救灾有两项内容：一项是在已发生强地震的现场，为了减轻可能的进一步的危害而应采取的措施；另一项是对短临强地震预报区所应进行的防灾准备工作。在图 1.2.2 中，用虚线分别标明地震危害性分析、地震区划、结构抗震和防灾四个部分，前两部分又常合称工程地震学，防灾又可称为社会地震学，它们共同组成地震工程学的全部内容。

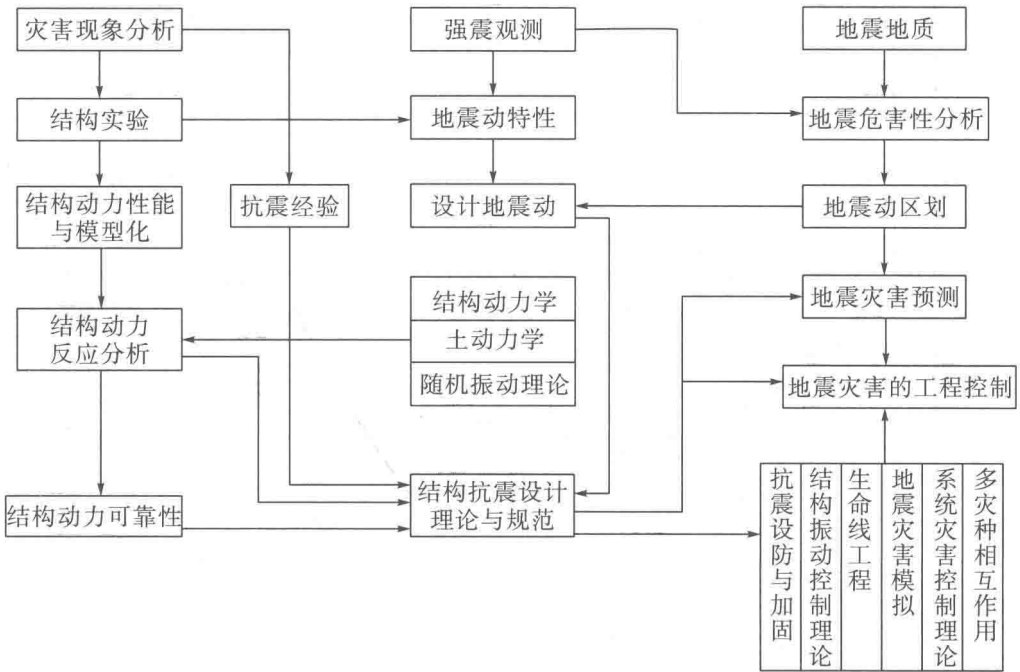


图 1.2.1 地震工程学的基本内容

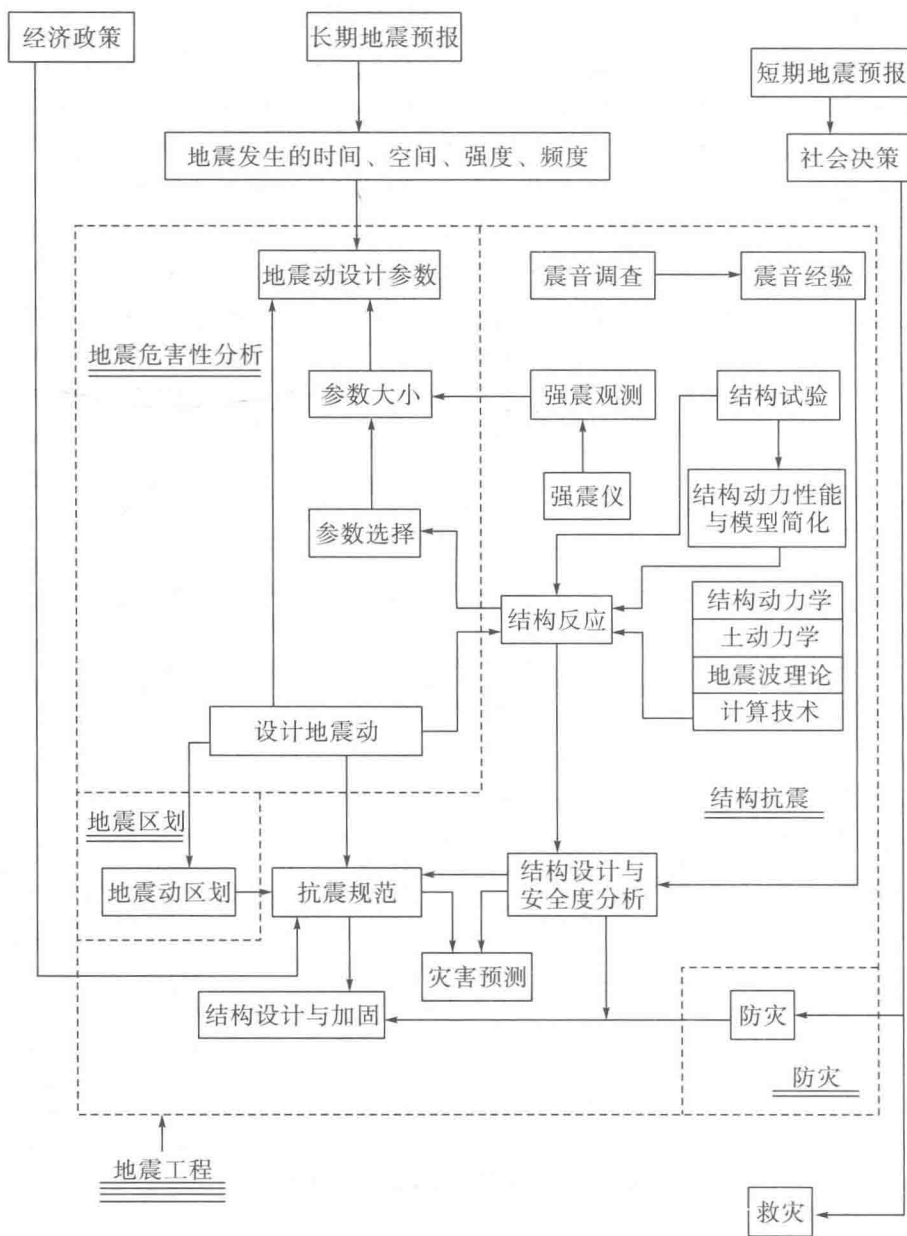


图 1.2.2 地震工程学的内容框图

1.2.1 地震动

地震动作为结构动力分析的输入，是工程结构动力性能与抗震减灾理论的基础，是地震工程学与地震学的交叉点。

在地震工程学中关于地震动的研究主要包括地震地质背景、强震观测、地震动基本特性、地震动的模拟及震害现象分析等。而地震学则侧重于震源物理机制及模拟，利用地震震相分析、地震的强度及分布规律来观察与分析地震动。通过这些观察与分析，并结合地

震学的其他手段,去判明地震活动性,对未来地震的发生与否做出判断和预报。地震工程对上述内容的研究,目的在于通过对地面运动规律、地震动特性、震害现象的了解和总结,结合地震工程学的后续内容,探求从工程角度减轻和控制地震灾害的方法。因此,地震动研究是工程结构动力性能与抗震减灾理论的基础。

1.2.2 工程结构地震反应

工程结构地震反应包括试验观察与理论分析两大部分。在试验观察中,可以根据对地震动的认识,设计并进行各种结构类型的静力试验、动力试验和拟动力试验。通过试验现象的分析与总结获得对结构物动力基本性能某种程度的了解,用以指导今后的结构抗震设计。关于工程结构地震反应的理论分析主要以结构动力学、土动力学、随机振动理论、结构动力可靠度理论等为基础。一般来说,在两部分中,前者着重于单体构件的实验分析,后者则倾向于实现整体结构物的模型化描述。近年来,随着模拟地震振动台试验的开展,实验与理论都在朝着对整体结构动力性能进行研究的方面迈进。

1.2.3 抗震减灾理论

抗震减灾理论是近年来颇为活跃的一个领域。从根本意义上说,研究地震动与工程结构的动力性能,目的在于减轻、控制地震灾害。因此,抗震减灾理论主要包括抗震设计理论、结构振动控制理论、地震危险性分析、震害预测理论、防灾规划与灾害控制理论等方面的内容。显然,这是一个相当广阔的领域。

地震工程学上述三部分的基本内容构成了一个有机的整体,没有对地震动的了解,地震工程学的研究就成为无本之木;没有抗震减灾理论的发展与应用,地震工程学的研究就只是纸上谈兵。同样,在现阶段的科学技术水平下,没有对工程结构地震反应的研究,人类也很难真正有效地减轻和控制地震灾害。

地震工程学属于综合型的应用科学,除了具有应用科学的一般特点外,地震工程学自身的特点还表现在以下四个方面。

第一,强震观测、震害经验与试验研究是地震工程学的基础。

地震工程学是一门理论与实践结合的学科,属于综合型应用学科,除了需要系统的理论知识外,还有赖于强震观测、震害经验和试验研究等经验背景。强震观测是研究地震动的基础,也是进行结构动力试验的主要依据。正是在强震观测记录的基础上,提出并完善了抗震设计的反应谱理论,开辟了结构随机地震反应分析的研究领域,发展了结构的振动台试验技术和拟动力试验技术。同样,对震害经验的总结,始终是人们进行抗震设计、完善抗震技术、开拓研究领域的重要依据,进行典型环境下的试验研究是现代应用科学的基本手段之一。以研究地基和结构动力性能为目的的现场与室内试验,是丰富地震工程学内容、改进地震工程学理论的有力手段。

第二,地震作用是地震工程学研究的重点。

地震作用属于动力荷载。它与一般静力荷载的区别体现在以下三个方面:其一,结构所承受的动力荷载的大小与结构自身特性密切相关,即结构的质量与刚度大小的变化直接

影响地震作用的强弱。而对于静力荷载，其大小至少与结构刚度特性基本无关。其二，地震作用是一种不规则的循环往复荷载，因其不具有解答静力问题的唯一性，而具有时间概念。从工程意义上说，这一特点导致了对地震作用峰值的关注。其三，与静力荷载相比，地震作用具有更大的随机性，导致抗震设计不能完全依靠强度安全储备。

这种随机性不仅表现在发生过程中的不确定性上，而且表现在发生地点、时间、强弱的不确定性上。这一特点的后果之一便是抗震设计有别于一般静力设计的重要概念差别：在静力设计问题中，有结构强度安全储备的概念，而在抗震设计中，不能完全依靠强度安全储备。地震作用的复杂性使之成为地震工程学研究的重点。

第三，结构非线性与复杂地震动输入是地震工程学研究的热点。

由于地震作用在强度上的不确定性，结构物可能在未来强震中进入塑性状态，因而结构非线性地震反应分析是地震工程学的一个研究热点，尤其是考察往复荷载作用下结构累积损伤的非线性变化过程。另外，一般结构物都可能在未来强震中进入破坏阶段，这一概念是地震工程研究者应该牢牢建立起来的基本观念。由于地震作用的时间过程特性，对结构的非线性性质不能仅局限于极限破坏状态的研究（这是静力荷载设计的基础），而要考察结构在往复荷载作用下的非线性变化过程。结果发现：控制结构破坏的基本变量不仅与结构所能承受的最大荷载有关，而且与结构的最大变形反应和累积损伤破坏有关。由此发展了强度—变形双重设计准则、基于最大变形—能量累积耗损的双重破坏准则等。同时，随着近年来地震动记录的大量获取和实验技术的发展，以及地震动差动台阵强震数据的丰富和大跨度空间结构的修建，考虑复杂地震动输入（多维、多点输入）的理论与试验研究工作日趋增多，并逐渐形成了现代地震工程研究中的新热点。

第四，广泛应用概率论、控制论、规划论是地震工程学的发展方向。

近年来，基于随机振动理论的结构动力可靠性理论的建立，与结构隔震、减震技术相关联的结构振动控制理论的兴起，以灾害预测学、系统运筹学和系统控制论为基础的防灾规划论的萌芽，标志着地震工程学的发展已进入一个新的阶段，同时，也标志着地震工程学在未来将具有的新特点。这些特点将使地震工程学的研究向大系统、可控制的方向迈进。

1.3 地震工程学发展简史

人类关于地震的文字记载已有 4000 多年的历史（公元前 1831 年首次在中国留下了地震文字记载，见《竹书纪年》）（如图 1.3.1 所示）。公元 132 年，中国的张衡发明了候风地动仪（如图 1.3.2 所示），并于 138 年在世界上首次记录了地震的发生。而直到 18 世纪后期，欧洲才出现近代意义上的地震仪。

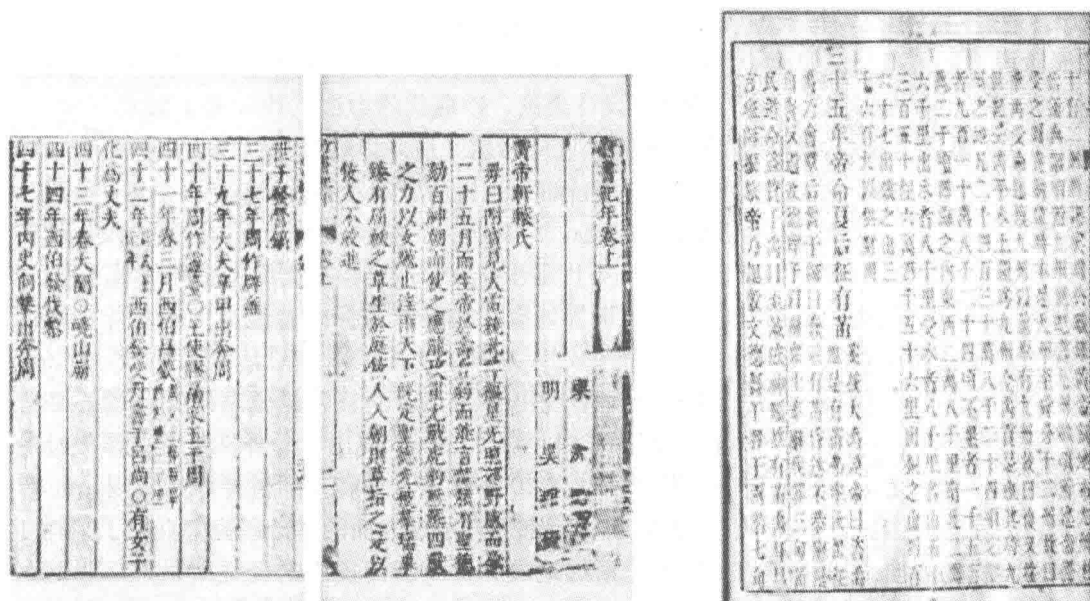


图 1.3.1 《竹书纪年》上的地震文字记载

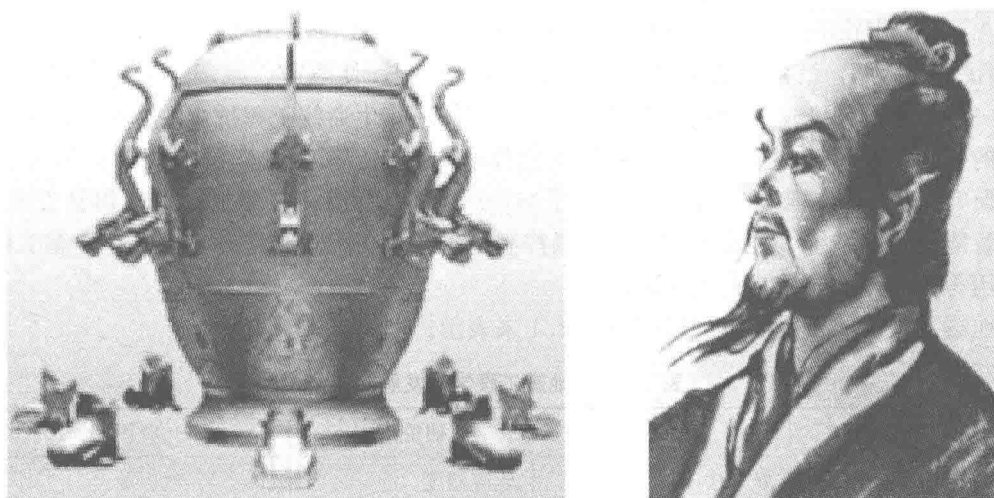


图 1.3.2 张衡发明了候风地动仪

作为科学的地震工程的萌芽与发展仅有一百余年的历史。1874 年，西伯格给出了地震烈度表的雏形。1883 年，在地震调查资料的基础上，制订了罗西—佛瑞尔地震烈度表，对烈度表的修订工作至今仍在继续。与对地震宏观震害的认识相适应的是在抗震设计中采用经验法则。1900 年前后，日本学者的研究奠定了“静力法”的基础。1920 年，日本学者（今村明恒等）通过对地震仪位移记录的研究，提出了地震动是简谐振动的观点，这在今天看来虽有失偏颇，但它首次把振动观点引入地震工程研究之中，具有重要的历史意义。日本学者石本已世雄在 20 世纪 30 年代初开始观测强地震动加速度过程，并取得了一些中、弱震记录。但在他去世后不久，这一工作因不受重视而中止。与此相反，美国则在日本的影响下开展并发展了强震观测工作，并迅速在各方面赶上和超过了日本的研究水平。1933 年，美国在长滩地震中得到了第一批强地震记录。1940 年，比奥特 (M. A.

Biot) 通过对强地震动记录的研究, 首创反应谱这一新概念, 为地震工程学进入一个新的发展阶段打下了基础。50 年代初, 豪斯纳 (G. W. Housner) 发展了这一理论, 并在加州抗震规范中首先采用反应谱作为抗震设计理论, 以取代静力法。1950 年, 潘恩 (S. L. Pan) 首次研究了受地震作用系统的非弹性反应问题。后来以纽马克 (N. M. Newmark) 为首的研究者们发展了这一工作。1959 年, 纽马克提出了逐步积分法, 并于 1960 年提出了弹塑性反应谱, 以结构的延性概念为核心, 给出了将弹性反应谱修改为弹塑性反应谱的具体方法。在上述工作的基础上, 于 50 年代逐步形成了以工程抗震为主题的地震工程学。1956 年在美国加州伯克利召开的第一届世界地震工程会议, 标志着地震工程学作为一门正规的学科进入到近代发展阶段。

20 世纪 60 年代以来, 地震工程研究呈现出百花齐放的繁荣景象, 研究范围不断拓宽, 研究深度不断进展。1960 年, 布鲁姆 (J. A. Blume) 提出了非弹性系统抗震设计的能量概念, 开能量法研究的先河。继豪斯纳在 40 年代末对地震动随机特性的发现, 60 年代初, 苏联、美国、日本和中国的地震工作者都进行了这方面的基础研究, 开辟了结构随机振动分析的方向。1964 年, 美国阿拉斯加地震和日本新泻震中的场地严重破坏引起了人们对场地地基抗震问题的普遍关切, 大量研究促成了地震工程地质学的建立。60 年代中期, 我国学者做出了按场地条件调整反应谱这一具有独创性的工作。1968 年, 科内尔 (C. A. Cornell) 提出地震危险性分析的点源模型, 成为用概率论研究地震发生模型的前导。70 年代后期, 结构振动控制概念被引入地震工程, 使隔震、减震、制震的研究具备了统一的理论框架。这一时期具有普遍意义的工作还有生命线工程抗震的起步、数字化强震仪的研制、振动台试验的开展、系统识别技术的研究、模糊数学的应用等。80 年代以来, 研究工作者的视野进一步扩大, 除了与 70 年代相衔接的各项工作迅速得到发展外, 人工智能与专家系统、灾害预测学与灾场控制论、系统工程学和社会心理学在地震工程中的应用等方面, 都开始为人们所瞩目。

地震工程学的发展简史可以用表 1.3.1 来表示。

表 1.3.1 地震工程学的发展简史

年 代	萌芽期	研究期	应用期
20 世纪 20 年代以前	静力法	地震烈度	
20—30 年代	简谐振动说 强震观测与结构实验	静力法 (刚柔之争)	静力法
40—50 年代中期	反应谱 随机振动说	强地震动特征 结构实验	静力法
50 年代中期—60 年代末	场地问题 动力反应分析	反应谱 结构非线性性能 随机振动理论	静力法与反应谱
70 年代	结构控制 生命线工程 伪动力实验	动力反应分析 振动台模拟实验 系统识别 强震加速度合成	反应谱与静力法