

地震工程 的概念和应用

DIZHENGONGCHENG DE GAINIAN HE YINGYONG

张敏政 编著



地震出版社

地震工程的概念和应用

张敏政 编著

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地震工程的概念和应用/张敏政编著. —北京:地震出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5028-4538-4

I. ①地… II. ①张… III. ①工程地震—研究 IV. ①P315.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 000307 号

地震版 XM3717

地震工程的概念和应用

张敏政 编著

责任编辑: 樊 钰

责任校对: 刘 丽

出版发行: 地震出版社

北京市海淀区民族大学南路9号

发行部: 68423031 68467993

门市部: 68467991

总编室: 68462709 68423029

<http://www.dzpress.com.cn>

邮编: 100081

传真: 88421706

传真: 68467991

传真: 68455221

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大天成印务有限公司

版(印)次: 2015年12月第一版 2015年12月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 621千字

印张: 25.5

书号: ISBN 978-7-5028-4538-4/P (5230)

定价: 78.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

前 言

地震工程是一门跨学科的知识，其最终目标在于建造能抗御地震作用的工程结构，减少灾害性地震带来的人员伤亡、经济损失和对社会运行发展的影响。作为交叉边缘学科，地震工程不可避免地要涉及多学科的理论和方法；其技术成果在防震减灾领域有广泛的应用。

论述地震工程的中外专著传世甚多，其中不乏理论与实践结合的名作。本书作者不惭贻陋再编新本，乃是从一个工程师的角度叙述自己对地震工程相关概念的理解以及对工程应用和发展前景的思索。与其他著作相比较，本书具有如下特点。

其一，在较宽的知识范围内介绍相关概念和应用领域，以供不同专业背景的读者全面了解地震工程。地震与地震工程是难以分割理解的，土木工程专业人员与地学工作者必须相互交流，了解对方的学科特点和研究成果；地震工程研究和应用中要涉及多学科的知识，采用多种技术途径和方法，有关试验设施、损伤探测、信号处理的应用知识是不可缺少的；土木工程抗震涉及各类建、构筑物 and 桥梁、大坝等，本书具体内容并不局限于房屋；地震工程研究成果可拓展应用于建设规划和地震应急等领域，本书就此也作了简要介绍。

其二，作者虽无深入的研究成果以飨读者，但基于数十年的工作经历，阐述了对某些相关基本概念的理解，也提出了对当前地震工程研究以及实际应用中某些问题的思考，诸如地震工程知识的不确定性、精细的结构分析是否为工程抗震的关键所在，对抗震设计中某些传统概念和方法的理解，以及地震工程发展与社会经济技术水平的关系等；希冀抛砖引玉，促进学术的百家争鸣。

其三，囿于作者能力和拙作的篇幅，本书不企图介绍有关结构工程、结构动力学、结构控制等系统的基础理论，也只简述了工程地震学的部分内容，关于技术标准内容的引用甚至是支离破碎的，好在这些知识在很多教科书和专著

中已有相当详尽的阐述。但是，作者却有意简要回顾相关领域的历史沿革，也零星介绍了国外的动态；了解历史方能展望未来，取它山之石可资攻玉。

本书内容庞杂，显然不宜用作教材，但可供讲授地震工程相关知识参考。本书可供从事地震工程研究和应用的大学生、研究生和工程技术人员阅读；但是，非地震工程专业技术人员也可能会从书中读到他们感兴趣的内容。作者甚至希望，防震减灾领域的管理者能在批判地阅读本书后提高指导全局工作的能力。

编者

2015. 7

目 录

第一章 绪论	1
第一节 地震工程的起源和发展	1
第二节 地震工程研究的内容和方法	13
第二章 地震和振动的基本概念	17
第一节 地震成因和板块构造	17
第二节 震源	27
第三节 地震波和地球结构	33
第四节 地震烈度	41
第五节 振动分析	50
第三章 强地震动	60
第一节 强地震动的观测	60
第二节 强地震动及其三要素	62
第三节 地震动参数的变化及其影响因素	67
第四节 强地震动时间过程的生成	72
第五节 地震危险性分析和地震区划	75
第四章 结构地震反应分析	82
第一节 结构模型	82
第二节 结构本构关系	90
第三节 结构体系的地震反应分析	100
第四节 结构地震作用计算的简化方法	107
第五节 多点输入的结构地震反应分析	122
第六节 土-结相互作用体系的地震反应分析	125
第七节 结构的随机地震反应分析	139
第八节 结构抗震可靠度分析	142
第五章 抗震试验	147
第一节 概述	147
第二节 主要试验方法	153
第三节 量纲分析和相似模型设计	177

第四节 试验数据分析	185
第六章 抗震设防和抗震设计	206
第一节 设防目标和设防标准	206
第二节 抗震概念设计	212
第三节 抗震验算	250
第四节 抗震措施	260
第五节 性能化抗震设计	276
第六节 抗震鉴定加固	287
第七节 抗震技术标准	311
第七章 结构控制和损伤检测	318
第一节 结构控制概说	318
第二节 主动控制与半主动控制	320
第三节 消能减振	334
第四节 基底隔震	348
第五节 结构损伤检测	357
第八章 抗震防灾规划和地震应急	371
第一节 抗震防灾规划	371
第二节 地震应急	393
结语	399
参考文献	400

第一章 绪 论

地震工程学研究工程结构、尤其是土木工程在遭遇强地震动时的安全问题，是防震减灾事业最重要的知识和技术基础。尽可能减少地震引起的人员伤亡和经济损失，保障社会的正常运行和发展，是地震工程学的根本目标。本章简要论述地震工程的起源与发展历程，地震工程研究的内容与方法，以及地震工程所取得的成果与发展前景。

第一节 地震工程的起源和发展

我国有世界上最早的地震事件记录，据《竹书纪年》载：“夏帝发七年（公元前 1831 年）泰山震”。强烈地震自古便是人类感知的自然现象，它改变着自然环境，危及人类的生命并摧毁人类创造的物质财富。古代社会的很多智者早已注意到了地震现象，并对地震的成因作出了种种解释和猜测。例如，中国古代曾以“阴阳说”解释地震的发生，并以“天人感应”将地震与社会的变动相联系；日本民间则认为地震是由地下一个状似鲶鱼的神灵所控制；对古代地震的许多引喻可在《圣经》和当时其他宗教著述中见到。但是，这些大多与神话、宗教相关的记载显然不能纳入现代科学的范畴。

然而，早在希腊科学发展的早期，学者已开始考虑用地震的物理解释取代民间传说和神话提示。古希腊哲学家安乃克西门内斯（Anaximenes，约公元前 585—前 528 年）认为地球的岩石是大地震动的原因：当岩体在地球内部落下时，它们将碰撞其他岩石，产生震动。一些自然现象，如位于约旦河谷的杰里科城墙的倒塌和红海的开裂，曾被那些不迷信超自然事件的人解释为地震的结果。希伯来先知撒迦利亚（Zechariah）的书中甚至有一段对地震成因的卓越描述：“橄榄山（位于巴勒斯坦，是犹太教和基督教的圣山）将从中间劈开，一半向东，另一半向西，那里将出现一个大谷；山的一半将向北移，另一半向南移动。”这一段文字叙及的岩石滑动和地震之间的物理联系直至 20 世纪末才被人们理解，这表明古人已经对地震成因的物理理解迈出了第一步。第一个关于地震物理原因的全面解释是由希腊学者亚里士多德（Aristotle，公元前 384—前 322 年）提出的。他抛开宗教和占星术，认为地下火烧毁地下洞穴的支护，洞顶坍塌将导致地震动。当然，这些关于地震成因的猜测尚不能称为地震工程科学的发端。

叙及地震科学的发展，不能不提及我国东汉时期的科学家张衡在公元 132 年制造的、颇具艺术性的“候风地动仪”（图 1-1-1）。设计者的意图是让它指示地震的发生和地震波传来的方向。很不幸，候风地动仪详细的内部构造没有被精确的技术文献保留下来，这台精巧的仪器失传了。此外，在长期的中国封建社会中，官方编撰的史籍和民间著述常有地震发生和震害、救灾的记载，明王朝（1368—1644 年）已开始编制地震年表，清宫档案中存留大量有关皇家赈灾的文献，这是研究地震活动性的宝贵资料，遗憾的是鲜有关于抗震科技的记载。在西方，最早的有关地震的记载可追溯到摩西律法的颁布（约公元

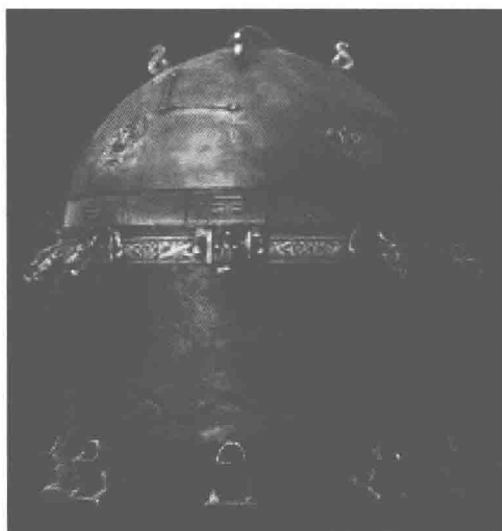


图 1-1-1 现代复原的候风地动仪

前 1200 年)；在那以后接近 3000 年，直至 1564 年意大利地图绘制者伽斯塔第 (J. Gastaldi) 在地图上用不同颜色标注滨海阿尔卑斯 (Maritime Alps) 地震影响和破坏程度不同的地区，才反映了西方人对地震的更为深入的探索，其工作可视为地震烈度概念和烈度分布图研究的雏形。

18 世纪，受伊萨克·牛顿 (Isaac Newton) 有关波和力学著述的强烈影响，自然科学的新时代开始了。一些科学家、工程师开始了地震相关领域的研究，其中包括胡克定律和杨氏模量的提出者罗伯特·胡克 (Robert Hooke) 和托马斯·杨 (Thomas Young)。前者于 1705 年发表了《关于地震和火山喷发的讲演》，向现代板块构造学说迈出了第一步；后者于 1807 年出版

《自然哲学的讲演》，涉及地震和地震工程；这些似乎是欧洲最早的有关地震研究的科学文献。地震学研究的前驱者、英国工程师米歇尔 (J. Michell) 试图用牛顿的力学原理讨论地震动，他相信地震是地表以下几英里处岩体移动引起的波动。

19 世纪，英国土木工程师梅莱 (Robert Mallet)、矿业工程师米尔尼 (John Milne)、机械工程师伊文 (James Ewing) 和格芮 (Thomas Grey) 对地震学和地震工程学的建立做出了里程碑式的贡献。他们发表研究报告，把地震和穿过地壳岩石的机械波联系起来；这些研究报告很重视山崩、地面运动、海平面变化等地震地质效应和建筑物毁坏。梅莱提出了地震学、震中、震源、等震线和极震区等一系列当代广泛使用的概念和术语；他在 1848 年发表论文《关于地震的动力学》，讨论了地震效应、地震波和海啸，并提出了电磁式地震仪的构思；他还研究了意大利 1857 年发生的那不勒斯地震，并编制了长达 600 页的地震目录。依据梅莱的思路，意大利人帕尔麦利 (Luigi Palmieri) 实际制造了地震仪。伊文和格芮先后在美国印第安纳州玫瑰理工学院和日本东京大学任教，对地震现象和地震灾害殊感兴趣，并协助访日的英国工程教授米尔尼设计并制造了很灵敏的地震仪。他们研究了地震图，与日本科学家关谷清井 (Seikei Sekiya) 和大森房吉 (Fusakichi Omori) 一起组织了日本地震学会，创立了现代地震学和地震工程学。

如前所述，大约在 18 世纪初到 20 世纪初的 200 年间，地震学和地震工程学并未分离，还不存在现代意义上的地震工程学科。而后，在伴随工业革命的科学技术大发展中，产生了基础学科与工程学科的不同研究层阶，地学和土木工程学在各自范围内飞速发展的同时，形成了不同的研究方向。以抗震防灾为目标的具有学科交叉特色的现代地震工程研究始于 19 世纪和 20 世纪之交，至今只有大约百年历史。详述地震工程的起源是困难的，早期地震工程的若干发现并未留下文献记录，有些文献记录业已遗失，也有些文献资料是令人费解或可能产生误解的。例如，有些建筑规范中的抗震要求从未被工程师或建筑师所采用；相反，某些工程师的抗震设计是在建筑规范中尚未包含抗震要求时做出的。我国存

留至今的大量古代殿堂楼阁具有优良抗震性能,经历了多次破坏性地震的考验,但我们无从知晓其设计者是否曾具体考虑了抗震要求。

一、地震工程的诞生

地震工程学科伴随三次破坏性地震而诞生。

1891年10月28日,日本发生8.0级(亦有资料称震级为8.4)浓尾地震,地面断裂水平错距最大为7 m,垂直最大错距为4 m。山区发生岩崩和滑坡,平原产生地裂和喷砂冒水;冲积平原地区震害最为严重,表现为堤防塌陷开裂,水闸涵洞受损,水坝开裂滑移,公路、铁路路堤沉陷,钢桁架桥破坏(图1-1-2)。名古屋邮局、银座饭店等欧式建筑受损,大阪纺织公司百余名女工被烧死在封闭的工房内。房屋破坏和次生火灾导致7000余人丧生,17000余人受伤。地震波及东京到大阪的本州岛广大地区,被日本历史学家称为开天辟地之一动。



图1-1-2 浓尾地震中损毁的钢桁架桥

震后,日本成立了震灾预防调查会,认识到晚第四纪构造活动及其与地震的关系,并发表《木结构住宅抗震要点》,推荐采用拉杆、斜撑和铁箍等抗震构造措施,开始全面推进地震工程的研究与应用。

1906年4月18日美国发生8.3级(后有资料修订为矩震级7.9级)旧金山地震。这次地震导致地表断裂长度达470 km,沿圣安德烈斯断层发生巨大位错,错动以水平方向为主,最大错距为7 m。一分钟内,旧金山及附近城镇改变了面貌;旧金山的房屋倒塌或变形,烟囱坍落,街道如波浪起伏不平,人行道龟裂,电车轨道弯曲。岩石山坡上的建筑破坏稍轻,但也造成烟囱倒塌,窗户破碎,家具、盘碟和其他设施损毁。建于山间不很坚硬地基上的房屋破坏十分严重,坍塌的砖瓦房屋阻塞了道路,砌体结构的市政府大厦毁坏。海边松软地基上的房屋损失更大,许多房屋完全倒塌,有些则因地基下沉而损毁;沿海填土地区的木造旅馆完全倒塌。圣塔罗莎、圣荷西以及斯坦福大学也都遭受严重的损害。加利福尼亚旅馆的圆屋顶倒塌撞毁了消防站屋顶,将睡在房中的旧金山消防队队长埋在一片瓦砾之中。地震时由于烟囱倒塌、烟道堵塞、煤气泄漏及火炉翻倒,旧金山市有50多处同时起火。虽然大部分水源地的蓄水库未受破坏,但自来水管却几乎完全损坏;埋置于坚硬地基中的自来水干线破坏较轻,而松软地基或沼泽地上的管道大多破裂或扭曲。地震毁坏了大部分上下水道和消防站,供水不足和断水延误了救火的时机,消防人员只能从沟渠、水塘和水井里抽水救火。市区内用炸药爆炸开辟防火带的企图未能成功,火势迅速蔓延,在三个街区持续燃烧了三天三夜以上,10 km²的市区几乎被完全烧光(图1-1-3,图1-1-4)。震后社会秩序混乱,市长颁布了允许警察和士兵可以当场对抢劫者开枪的命令,总共有约500人遭枪击。尽管当时的旧金山市城市规模不大,人口只有40万,但确认的死亡和失踪者逾千人(亦有资料估计为数千人),20多万人无家可归,总经济损失达

100 亿~200 亿美元。



图 1-1-3 烟尘弥漫的旧金山街道



图 1-1-4 损毁的旧金山市政厅

这次地震中，圣安德烈斯断层向西北方向滑动造成的巨大破裂引起了科学家和工程师的极大关注，1911 年美国学者里德（H. F. Reid）根据以上事实，提出地震成因的弹性回跳假说，这一假说此后广泛用于某些断层破裂的解释；其构造背景也与此后发展的大陆漂移、海底扩张和板块学说相吻合。

1908 年 12 月 28 日意大利发生 7.5 级墨西拿地震，造成了欧洲历史上有记载的最为惨重的地震灾害（图 1-1-5）。地震震中位于西西里岛墨西拿海峡底部，刹那间海峡两岸的墨西拿市和卡拉布里亚市的建筑物强烈抖动摇晃。墨西拿市区因更靠近震中而损失惨重，富丽堂皇的钟楼、教堂、剧院相继坍塌，以低矮砌体结构为主的大部建筑化为废墟。地震还使得海峡两岸的陡峭悬崖纷纷坍塌坠落海中；近海掀起局部浪高达 12 m 的巨大海啸，巨波激浪横扫海岸直冲市区；大地下陷了 0.6 m。地震中墨西拿大主教被压在倒塌的宫殿下，5 天后他幸运地获救，但其他很多人在倒塌的房屋中遇难；一些从废墟中爬出来的人转瞬间又被涌进市区的巨浪卷走。随之而来的饥饿和疾病夺去了更多人的生命，失去了家庭的男人和妇女纷纷自杀，不法之徒从死尸身上抢劫珠宝首饰；余震时王后也险些被仓皇出逃的人踩在脚下。这次地震造成 83000 人遇难（亦有资料称遇难人数为 10 万~20 万），经济损失约 10 亿美元。

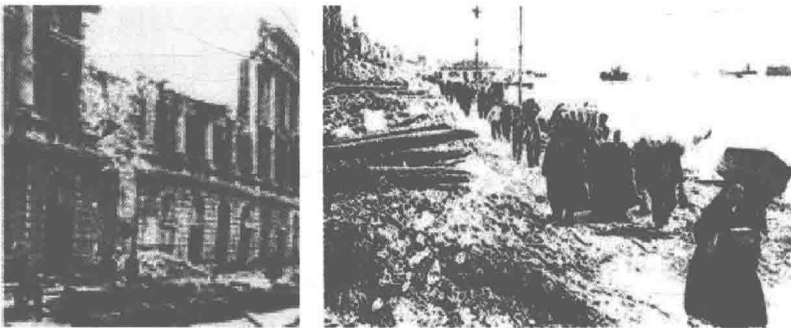


图 1-1-5 墨西拿地震中损毁的建筑和逃离的难民

震后，意大利政府任命 9 名工程师和 5 名教授组成了特别委员会，对地震灾害和建筑抗震进行调查研究。特别委员会的报告推荐采用静力法进行建筑抗震设计，具体规定房屋第一层应承受相当于 $1/12$ 结构重力的水平力，第二、三层则分别承受相当于 $1/8$ 结构重力的水平力。1909 年，米兰的结构工程教授丹拿索（A. Danusso）解释说，结构的地震反应本质上是动力效应，但采用动力方法计算太过复杂。自此，结构抗震计算的静力方法首先被一些先进的工程师所采用，后被列入意大利建筑规范；继而被日本和美国的建筑规范所采用。

二、地震工程的发展历程

地震工程从诞生到当今的发展大致可分为如下三个阶段。

1. 初创阶段（地震作用的静力分析阶段）

从地震工程的初创到 20 世纪 30 年代初，可称为结构抗震分析和设计的静力阶段。当时，人们已经认识到地震动是剧烈的往复运动，地震动加速度在地面结构上产生的水平惯性作用是导致建筑结构破坏的原因。在尚未取得强地震动观测记录的情况下，人们只能视经济和技术能力取某个固定量值的水平力（相当于结构质量与某一加速度的乘积）作用在地面结构上；用结构力学方法计算结构上的水平地震作用并进行抗震校核。这一时期，日本学者大森房吉（Omori Fusakichi）提出的抗震设计的“震度法”与静力方法如出一辙，所谓震度又称地震系数，表示为地震动加速度与重力加速度的比值；当时，作为抗震设计参数的震度一般取 0.1。

正如前述意大利丹拿索教授而言，结构动力分析的概念和方法当时尚未被工程界所普遍掌握，在日本，就曾经发生了结构抗震的“刚柔之争”。主张建造钢结构等柔性建筑的真岛健三郎（Majima Kensaburo）批评了当时的震度法，并致力于阐述动力理论，但遭到了佐野利器（Sano Toshikata）和武藤清（Muto Kiyoshi）的质疑；真岛则进行了反驳。由于在多次震害中柔性木结构和刚性砌体结构的震害复杂交织，且当时的日本建筑规范《市街地建筑法》中规定的震度法源于结构的刚性假定，故很多人投入到这场论争之中，真岛与武藤之间发生了激烈的争论。因为当时尚未得到真实的强地震动记录，对结构动力特性的差异及其对地震动的选频放大效应没有深刻理解，喧嚣一时的刚柔论争并未达到统一的认识，也没有产生新的抗震设计方法。

在地震工程的初创时期，太多的理论和实际问题有待解决，人们的思想十分活跃。面对纷纭复杂的各类结构的地震破坏现象，日本、意大利、瑞士、美国等国学者纷纷编制或修订地震烈度表，这是在获得强震记录之前试图衡量地震动强度的唯一途经；当时，甚至已经出现了有关隔震、消能和能量设计的思想萌芽；标志着人类开始将地震研究与工程建设相联系。

2. 全面发展阶段（地震作用的反应谱分析阶段）

进入 20 世纪 30 年代之后，地震工程研究和应用取得了若干重大进展。1931 年，石本已世雄（Ishimoto, M.）尝试用自己设计的加速度计记录地震动。1932 年，美国海岸和大地测量局的工程师弗瑞曼（J. R. Freeman）基于访美日本地震学家末广恭二（Kyoji Suyehiro）的构想，研制出世界上第一台实用的强震仪，并于次年的美国长滩地震中获得

了强震加速度时程记录，人类第一次观测到强震动的复杂变化和定量数值，认识到地震动是包含多种频率成分的复杂运动。继而，美国学者比奥（M. A. Biot）依据固体的弹性振动理论，利用单自由度弹性体模型计算得出了强地震动的反应谱。反应谱直观地显示了复杂强地震动不同频率成分的强度，在当时人类计算能力不高的情况下，为设计者考虑结构动力效应计算地震反应提供了可行的计算途径。至 50 年代，反应谱方法在国际范围被普遍接受。强震观测的开展和反应谱方法的建立标志着地震工程的一次飞跃，故这一时期常被称为结构抗震分析和设计的反应谱阶段。

为满足具体实施抗震设计的需求，确定不同地点的抗震设计地震动成为地震工程的另一重要研究领域。1936 年，苏联科学院地球物理研究所着手编制全苏地震烈度区划图；1948 年美国海岸和大地测量局编制了美国地震概率图；1951 年日本学者河角广（Kawasumi Hiroshi）依据历史地震资料、利用统计分析方法编制了不同重现周期的地震动加速度峰值区划图；1952 年苏联利用烈度调整的概念开展了城市地震小区划工作。这些进展形成了地震工程范畴内联系地震与抗震的工程地震学科。60 年代末，美国学者科内尔（C. A. Cornell）提出了地震危险性分析的概率方法，并广泛用于地震区划图的编制。

1956 年在美国旧金山召开了第一届世界地震工程会议，1963 年国际地震工程学会成立；地震工程学成为工程学科的一个分支，初步形成了自身的完整架构。

综上所述，20 世纪 30~60 年代是地震工程迅速发展的阶段，除强震观测、反应谱方法以及地震区划之外，这一阶段的研究扩展到若干新的领域。例如，美国学者豪斯纳（G. W. Housner）发表《强地震动的特性》，开创了随机地震动理论和方法的研究；振动理论开始被工程师掌握，强迫振动试验、结构模态参数测试试验、地震模拟振动台试验以及拟动力试验技术被陆续开发，为结构设计者提供了定量试验数据；结构的非线性地震反应分析开始引起研究者的兴趣，延性作为与抗震性能相关的重要概念被提出；同时，基于德裔美国学者瑞斯纳（E. Reissner）有关弹性半空间表面刚性圆盘振动问题的经典分析，地震作用下结构与地基间的动力相互作用引起了人们的广泛关注；1964 年日本新潟地震和美国阿拉斯加地震后，砂土液化研究和土的动力特性试验成为地震工程的活跃领域。

3. 深入发展阶段（地震作用计算的动力阶段）

20 世纪 70 年代以后，随着社会经济发展和技术进步，大坝、大型桥梁、核电站和海洋平台等大量兴建，重大工程结构的抗震安全提出了对地震工程的新需求；电子计算机应用的逐步普及，极大提高了人类的数值分析能力，结构地震反应的动力时程分析成为结构抗震分析和设计的新途径。

1971 年美国圣费尔南多地震发生，现代交通、供水、电力等系统遭受严重破坏，此后，生命线地震工程成为地震工程的重要一环。总结地震工程研究成果和震害经验，抗震设计技术标准逐步涵盖各种不同的结构体系和结构类型，规范内容更趋完善。其中，美国应用技术委员会编撰的《编制建筑抗震规范的暂行规定》（ATC-3-06）和日本的《新耐震设计法》（1980）是最具影响力的两部技术标准，其基本设计思想和设计方法沿用至今。

应当提及的是，1972 年美籍华人姚治平发表论文《结构控制的概念》，将振动控制理念引入地震工程，开启了此后约三十年间地震反应控制研究的热潮，并产生了若干应用成果。20 世纪末，1994 年美国洛杉矶北岭地震、1995 年日本阪神地震和 1999 年台湾集集地

震后,针对现阶段地震灾害引发的重大经济损失,地震工程界提出了性能化地震工程的概念,成为推进地震工程研究的更高目标。

三、中国地震工程的发展

20 世纪的前半叶,半殖民地和半封建的中国战火频仍,民不聊生,科学技术的发展远远落后于西方列强;虽有少数爱国科学家历尽艰辛致力于地震考察和观测,但切实的地震工程研究则始于新中国的建立。新中国成立初期,从美国归国的结构工程学家、杰出的爱国者刘恢先组建了工程力学研究所,他高瞻远瞩,紧密结合国家经济建设需求领导了地震工程的系统研究,并逐步形成了包括来自海内外学者的研究队伍。

1955 年,苏联《地震区建筑设计规范》(ПСП-101-51)在中国翻译出版,我国少数重要建筑参照此规范采用静力方法进行了抗震设计。1957 年,地震学家谢毓寿和李善邦分别主持编制了《新的中国地震烈度表》和《中国地震区域划分图》(未正式颁布使用);同年,国家基本建设委员会和发展计划委员会颁布了我国 298 个城市的基本烈度和抗震设防的规定。1961 年,针对广东新丰江水库建成后频繁发生的水库地震,着手对坝体进行抗震加固,同时开展试验性强震观测。1964 年,刘恢先主持的中国《地震区建筑设计规范(草案)》编制完成,采用了反应谱分析方法;次年,工程力学研究所试制成功电流计记录式强震仪,水利水电科学研究院和工程力学研究所分别研制成功动三轴仪。在建国初期极端艰苦的环境下,我国在地震工程领域奋起直追。

1966 年发生在河北邢台的两次破坏性地震造成数千人伤亡,此后为期十年的强地震活跃期推动了我国地震工程的全面发展。1970 年云南通海地震($M7.7$)和 1975 年辽宁海城地震($M7.3$)的震害考察,获得了大量震害经验。1976 年震惊世界的河北唐山地震($M7.8$)发生,华北工业重镇唐山市瞬间成为一片废墟,天津市遭受重创,地震波及包括北京市在内的从渤海湾到宁夏、从黑龙江到长江以北的华夏大地,共导致 24 万余人死亡,40 余万人受伤;直接经济损失约 100 亿元。面对惨烈的震害,总结用生命和鲜血换来的经验,中国《工业与民用建筑抗震鉴定标准》(TJ 22—77)颁布,国家投资数十亿元,开展了大规模的建筑抗震鉴定与加固工程。1978 年,涉及房屋建筑、公路工程、水运工程、水工建筑等的抗震设计规范接续颁布;《中国地震烈度区划图》(1977)编制完成,给出了全国各地未来百年内可能遭遇的最大地震烈度。80 年代初,我国台湾省开始布设强震观测台网,刘恢先主编《中国地震烈度表》(1980),1984 年中国地震工程联合会成立并于同年召开了第一届全国地震工程会议。至 80 年代后期,以电液伺服式地震模拟振动台研制成功和《建筑抗震设计规范》(GBJ 11—89)颁布为标志,我国各行业的抗震研究和抗震技术标准的编制全面开展,步入国际先进行列。

进入 21 世纪以后,胡聿贤主持编制的《中国地震动参数区划图》(GB 18036—2001)颁布,新编和修编的抗震设计、抗震鉴定加固、抗震试验技术标准覆盖了各行业的不同工程结构,地震工程界在结构振动控制、性能化抗震设计、抗震结构健康监测等领域的研究十分活跃;伴随我国改革开放后社会经济的高速发展,大型、数字化地震工程试验设施迅速增加。2008 年四川汶川发生 $M8.0$ 地震,在造成重大人员伤亡和经济损失的同时,也检验了抗震建筑的防灾能力。同年第 14 届世界地震工程会议在北京召开,展示了我国地震工

程发展 50 年的科学和技术成果。

四、地震工程的成果和前景

地震工程学科建立后历经百年取得了长足的发展，地震区划图和抗震技术标准作为最重要的技术成果，已经在世界各国广泛应用，并部分经受了实际地震的检验。从更广阔的防灾角度着眼，地学、工程地震学和地震工程学在不断扩展自己的研究领域和应用范畴。含地震学在内的地球物理学和地质学成为探索地震预报的主要途径；工程地震学的研究成果可用于城市土地利用规划；地震工程学与工程地震学结合的研究成果可用于结构易损性预测和地震保险；亦可用于地震烈度速报和地震预警。

(1) 评价地震工程研究的最终成果根本上应着眼于减少地震人员伤亡和经济损失的实效效果，但由于世界各国的社会经济技术发展水平不同，灾害数据的获取和损失评估极其复杂、难以精确，加之灾害性地震乃是罕遇事件，进行此类评估显然是相当困难的（表 1-1-1，表 1-1-2）。

表 1-1-1 中国现代地震灾害

年份	地震	震级	死亡人数	经济损失
1902	新疆阿图什	8. 25	500	
1920	宁夏海原	8. 5	200000	
1923	四川炉霍、道孚	7. 25	3000	
1927	甘肃古浪	8	4000	
1931	新疆富蕴	8	10000	
1933	四川叠溪	7. 25	6800	
1935	台湾新竹、台中	7	3200	
1937	山东菏泽	7	390	
1941	台湾嘉义	7	300	
1948	四川理塘	7. 25	800	
1966	河北邢台	6. 8、7. 2	8186	20 亿元人民币
1970	云南通海	7. 7	15621	40 亿元人民币
1975	辽宁海城	7. 3	1328	8 亿元人民币
1976	河北唐山	7. 8	242000	>100 亿元人民币
1988	云南澜沧-耿马	7. 6	748	28 亿元人民币
1990	青海共和-兴海	7. 0	119	3 亿元人民币
1996	云南丽江	7. 0	309	40 亿元人民币
1999	台湾集集	7. 2	2333	90 亿美元

续表

年份	地震	震级	死亡人数	经济损失
2003	新疆伽师-巴楚	6.8	268	14 亿元人民币
2008	四川汶川	8.0	87150 (含失踪)	6000 亿元人民币
2010	青海玉树	7.1	2968 (含失踪)	125 亿元人民币
2013	四川雅安	7.0	217 (含失踪)	20 亿元人民币

表 1-1-2 国外现代地震灾害

年份	地震	震级	死亡人数	经济损失
1891	日本浓尾	7.9	7273	
1896	日本三陆	7.1	27122	
1905	克什米尔	8.6	19000	
1906	美国旧金山	8.3	1000	>5 亿美元
1908	意大利墨西拿	7.5	83000	10 亿美元
1923	日本关东	7.8	142807	
1927	日本北丹后	7.5	2925	
1933	日本三陆	8.3	3008	
1935	巴基斯坦	7.5	30000	
1939	智利	8.3	30000	
1939	土耳其	7.9	23000	
1946	日本南海	8.1	1000	
1948	日本福井	7.3	3895	
1960	摩洛哥	5.6	12000	
1960	智利	8.3	120	
1964	美国阿拉斯加	7.9	130	
1970	秘 鲁	7.7	40000	
1972	伊 朗	7.0	17000	
1972	尼加拉瓜马那瓜	6.5	10000	
1978	伊朗	7.7	25000	
1985	墨西哥	8.1	9500	80 亿美元
1988	苏联亚美尼亚	6.9	25000	100 亿卢布
1994	美国北岭	6.7	55	400 亿美元
1995	日本阪神	7.3	6348	1000 亿美元

续表

年份	地震	震级	死亡人数	经济损失
1999	土耳其伊兹米特	7.4	14000	>200 亿美元
2001	印度古吉拉特	7.7	14000	45 亿美元
2003	伊朗巴姆	6.5	41000	10 亿美元
2004	印尼苏门答腊	8.9	300000	>100 亿美元
2005	印巴交界	7.6	88000	23 亿美元
2010	海 地	7.3	316300	19 亿美元
2010	智 利	8.8	802	150 亿美元
2011	新西兰	6.3	220	110 亿美元
2011	日本东部海域	9.0	27794 (含失踪)	3000 亿美元
2014	智 利	7.8	6	

但是，我们从百年以来的地震灾情统计中，仍可就地震工程研究对减轻地震灾害的作用一窥端倪。

就我国现代地震灾害来看，最明显的对比莫过于唐山地震和汶川地震。汶川地震震级大于唐山，且诱发的地质灾害远甚于唐山，救灾的难度也远大于唐山；但是，汶川地震遇难的人数却为唐山地震的三分之一。究其原因，虽然两次地震极震区的人口密度存在差异，但关键之处在于房屋抗震能力不同。唐山在震前的基本地震烈度仅为 6 度，是一座未实施抗震设防的城市。而在汶川地震震区，相当数量的新建工程已考虑了抗震设防。从震害现场的图像可以看出，震后唐山成为垮塌建筑的连片废墟（图 1-1-6），但在映秀镇和北川县城，很多房屋虽已严重损坏但并未倒塌（图 1-1-7，图 1-1-8），从而挽救了大量居民的生命。从图 1-1-8 还可以明显看出，北川县城有大片地段被山体滑坡掩埋，这是造成人员遇难的重要原因。再如，我国西部总体是经济欠发达、人口密度相对较低的地区，地震活动相对频繁；20 世纪 80 年代以来，尽管人口密度有所提高，西部 6 次 6.8~7.6 级地震的平均遇难人数不超过 800 人，但发生于 80 年代以前的 4 次 7~8 级地震，平均遇难人数则超过 6500 人；究其原因，也是抗震建筑减少了人员伤亡；在 1988 年的澜沧-耿马地震中，震区少量房屋业已实施了抗震设防。就单体建筑工程而言，我国近年地震灾害中，因采用抗震设计而提高了防灾能力的工程个例则不胜枚举。例如，汶川地震中都江堰市虹口乡的地震烈度为 IX 度，建筑、道路、桥梁毁坏严重，但虹口乡高原村三组 38 套在震前新建的示范民居（Ⅶ度抗震设防的砌体结构）仅有轻微损坏（图 1-1-9）。

在美国、日本等经济发达国家，由于工程结构普遍进行了抗震设计，近年来 6 级以上破坏性地震导致的死亡人数往往仅为数人或数十人。1923 年日本关东大地震时，仅有少量房屋进行了抗震设计，加之震后火灾的肆虐，死亡人数达 14 万之众；但 1995 年同样遭遇直下型地震的阪神地区，遇难者则为 6000 余人。太平洋东岸的智利，多次发生 8 级以上地震，1939 年的地震致使 3 万人遇难；但其后因实施抗震设防并采用较高的设防要求，地