

7184

56.259

美国工程科学院全国研究会地震工程研究委员会编

赠阅

# 论地震工程研究

(1982)

研究成果的应用

地震危险性估计

地震地面运动

土力学与土结构

分析与实验结构动力学

结构抗震设计

结构与液体的相互作用

社会和经济问题及地震工程教育

今后研究的措施和课题



地震出版社

# 论地震工程研究

(1982)

美国工程科学院全国研究会

地震工程研究委员会

编

罗学海 池江 译 徐祥文 朱镜清 校

地震出版社

1988

## 内 容 提 要

本书全面回顾了70年代以来美国及世界上在地震工程各领域,包括以往研究成果的应用、地震危险性估计、地震地面运动、土力学与土结构、分析与实验结构动力学、结构抗震设计、地震时结构与液体的相互作用、地震社会学和地震工程教育等方面的研究情况和所取得的进展,并提出了今后应抓住的重点课题。本书论述的是专业性问题,但又尽量避免使用专业术语,内容深入浅出,是地震工程专业的研究人员、教师、学生、工程技术人员及管理人员的必备参考书。

### Earthquake Engineering Research—1982

Committee on Earthquake Engineering  
Research Commission on Engineering and  
Technical Systems National Research  
Council

National Academy Press, 1982

### 论地震工程研究 (1982)

罗学海 池江 译 徐祥文 朱锐清 校

责任编辑: 蒋乃芳

---

地震出版社 出版

京复兴路63号

天津大邱庄印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

---

850×1168 1/32 8,125印张 215千字

1988年4月第一版 1988年4月第一次印

印数 0001—1600

ISBN7-5028-0013-1/P·1 3

(422) 定价: 2.40元

## 前 言

目前美国的建设投资每年大约为2300亿美元。这个总数中将近有1800亿美元花在大约40个以往经历过中强等地震的州（历史上尚未经历过普遍有感地震的州，仅有威斯康星、衣阿华和北达科他等几个。明尼苏达、密执安、密西西比、路易斯安那和佛罗里达则未经历过中强等地震）。从大地震会引起生命和大量经济损失这个观点来看，美国大力发展安全而又经济的抗震设计和施工方法，以减少地震灾害，是十分重要的。

在1967—1968年间，美国工程科学院全国研究会的地震工程研究委员会起草了一个报告，讨论与地震有关的实际问题，以及为解决这些问题而需要进行的研究\*。该报告的目的有三：

(1)简单说明地震问题的性质及目前人们对该领域的知识状况。

(2)向研究工作者指出知识不足及需要进一步研究的领域。

(3)提请政府当局及其它发起研究、指导研究或资助研究的机构注意地震问题，并向他们提供有助于制定计划的资料。

这个报告是有影响的，它唤起了对地震问题的关注，形成法律，并指导制定一个综合性研究计划，以求解决地震所提出的重要的安全和经济问题。

70年代，美国发生了许多破坏性地震。在1971年加利福尼亚州圣费尔南多地震中遭受的破坏最大，造成的损失达10亿美元以

---

\* Committee on Earthquake Engineering Research. Earthquake Engineering Research. National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1969.

上。随后在多方面制定了减轻地震灾害的实质性研究计划，国家科学基金会发展地震工程和地球物理学，美国地质调查局发展地震学和地质学，国家标准局发展建筑标准，原子能管理委员会发展核电厂抗震分析，联邦应急管理局发展救灾工作。在1981财政年度，联邦政府支持这些计划的总额近6000万美元。1969年的《地震工程研究》报告及随后的一个报告\*为这些计划的研究者和管理者提供了重要的指南。

1981年国家科学基金会要求全国研究会对地震工程研究进行再一次调研以评价1968年以来的进展，并为下一个十年推荐研究课题。调研的目的是提高美国正在进行的减轻地震灾害中有关工程方面的工作。

全国研究会为此专门组织了一个由各学科专家所组成的委员会，包括地震工程、土与岩石力学、结构动力学、结构设计、建筑学、生命线设施（运输、电力、通讯、上下水）的设计、灾害研究及海洋工程等方面的专家，还请了另外的专家在为本研究而安排的有关工作小组供职。

在起草这个报告中，该委员会陈述了下面两个问题：在地震工程方面已取得了什么进展？今后的地震工程研究应抓住哪些问题？由于1968年以来地震工程已有了很大的发展，以致该委员会在一个较短的报告不能对此予以全面的鉴定和讨论，因此本报告在这个意义上说是不完整的。但它确实包括了足够的内容，使我们明白确已取得了重大进展。

在反复讨论过程中，委员会搞清了研究计划能够取得显著进展的领域。在起草报告的时候，委员会的几个成员还访问了日本

---

\* National Science Foundation and Department of Interior, Earthquake Prediction and Hazard Mitigation Option for USGS and NSF Programs. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., September 1976

和中国，学习他们在地震工程研究方面所作的努力。委员会发现这两个国家花费的研究精力比美国大，特别是在实验研究方面。显然这两个国家在地震研究上迅速走向前列，按他们现在的努力程度，美国将继续落在更后面。

本报告所考虑的美国的研究工作主要是由国家科学基金会地震灾害减轻计划资助的在大学里进行的工作。报告还考虑了私人机构和政府实验室已进行的一些性质相同的研究工作。报告不包括纯地震的和纯地质的研究，除非是直接同地震工程有关的结果。旨在改善公众对地震反应的社会学性质的研究也考虑在报告之内。

地震工程研究是一项专业化的、高度技术性的课题。委员会试图避免使用专业术语，使报告易为非专业人员看懂，但在作为报告主体的专题论述的十章中，这个目的也许不是总能达到的。鉴于这个理由，并为了得到尽可能广泛的读者，本报告印成两种不同的形式。完整的报告包括十章专题论述和一章概括叙述这十章材料的导论，导论还包括对今后研究工作的建议。另外，导论已单独出版，并附有一个简短的摘要。

在起草这个报告的过程中，特别是学习了日本和中国的地震工程研究计划之后，有一点变得更清楚了，这就是只从国家科学基金会资助研究的观点来审查美国地震问题是太窄了，应当视问题的大小，为解决它而投入相应的力量。因此，报告提出了一个总的建议，就是要实施一个强有力的美国计划来解决地震问题。

地震工程研究委员会主席

G·W·豪斯纳

# 目 录

## 前言

<b>第一章 概述和建议</b> .....	( 1 )
地震问题.....	( 3 )
地震工程研究成果的应用.....	( 6 )
结构抗震设计.....	(12)
地震危险性估计.....	(18)
地震地面运动的记录和分析.....	(26)
土力学和土结构.....	(30)
分析与实验结构动力学.....	(34)
地震时结构与液体的相互作用.....	(37)
社会和经济问题.....	(40)
震后调查.....	(43)
地震工程教育.....	(49)
日本的研究工作.....	(52)
总的结论和投资建议.....	(55)
<b>第二章 以往研究成果的应用</b> .....	(59)
研究工作带来的好处.....	(61)
住宅、学校和公共建筑.....	(63)
应急设施.....	(65)
必需设施.....	(66)
关键设施.....	(68)
商业、财政和工业设施.....	(70)
政府设施和业务部门.....	(71)
防震计划、防备和反应措施.....	(71)

结论·····	(74)
<b>第三章 地震危险性估计</b> ·····	<b>(76)</b>
历史地震活动性·····	(77)
地震记录·····	(77)
地质研究·····	(81)
东部地震与西部地震的比较·····	(86)
最大的地震·····	(87)
概率方法·····	(88)
地震预报·····	(88)
水库诱发地震·····	(90)
强震地面运动·····	(91)
结论·····	(91)
<b>第四章 地震地面运动</b> ·····	<b>(93)</b>
强地震地面运动的测量·····	(96)
台网和台阵·····	(99)
数据处理·····	(101)
数据传送·····	(102)
数据解释·····	(102)
强震数据与设计·····	(104)
获取强震数据计划的管理·····	(107)
强震地震学·····	(108)
断层力学和震源参数·····	(109)
强震的模拟·····	(111)
从中等地震资料外推地面运动的上限·····	(112)
从加州地震数据推断美国东部的强震·····	(113)
<b>第五章 土力学和土结构</b> ·····	<b>(115)</b>
局部场地条件对地震动的影响·····	(116)
土-结构相互作用·····	(118)
地震时的土壤液化·····	(119)



土坝	(121)
挡土结构、隧洞和管道	(123)
边坡稳定	(124)
对土壤特性的认识和估计	(125)
今后的研究工作	(129)
<b>第六章 分析和实验结构动力学</b>	<b>(133)</b>
动力分析方法	(135)
地基与结构的相互作用	(140)
结构性能的实验研究	(142)
振动特性的现场测量	(146)
系统识别	(150)
结论	(151)
<b>第七章 结构抗震设计</b>	<b>(152)</b>
结构的发展和材料	(154)
现有建筑物	(160)
桥梁	(164)
关键设施	(166)
军事防护结构的应用	(167)
公用事业生命线	(168)
机械及电器设备	(169)
建筑学问题	(171)
结论	(176)
<b>第八章 地震时结构与流体的相互作用</b>	<b>(177)</b>
混凝土坝	(178)
贮液罐	(184)
近海结构	(189)
海啸	(194)
<b>第九章 社会与经济问题</b>	<b>(199)</b>
地震灾害信息的传播	(201)

家庭、邻里和社会反应·····	(205)
经济方面·····	(207)
行政和立法方面·····	(210)
不同的影响和反应·····	(214)
结论·····	(217)
<b>第十章 地震工程教育·····</b>	<b>(218)</b>
科学计划·····	(218)
出版物·····	(220)
继续教育·····	(221)
专题报告会与讨论会·····	(222)
学术会议·····	(224)
情报服务计划·····	(226)
地震工程教育对地震安全性的影响·····	(228)
建议·····	(228)
<b>第十一章 日本的研究工作·····</b>	<b>(230)</b>
概述·····	(231)
地震警报·····	(232)
地震动·····	(234)
地震灾害·····	(234)
建筑规范·····	(235)
建筑与工程设计·····	(236)
海啸研究·····	(238)
地震预防·····	(239)
社会经济方面·····	(241)
地震教育·····	(242)
新的实验研究设备·····	(243)
研究经费·····	(245)
结论·····	(247)

## 第一章 概述和建议

在本报告中，地震工程被明确地解释为为减轻地震灾害而作的实际努力。因此地震工程研究是指对破坏性地震提出的问题进行研究并给予解决。这些问题可包括地震危险度估计，破坏性地面运动的性质和特征，结构在地震时的表现，结构和设备的抗震设计，以及对公众的保护等。本报告试图评价以往地震工程研究对工程实际，对破坏的减轻及将来发生地震时对公众的安全和福利产生的影响，据此对这种研究的效益作出估计。另外，本报告还指出了在今后的研究计划中应当给予特别考虑的研究领域。在起草本报告的时候，有一点变的愈加明显，就是在美国，地震问题比以往通常考虑的要广泛得多。我们现代工业化社会的各个方面都可能受地震的严重影响，因此若要解决地震问题，就必须对它的各个方面都予以考虑。

地震工程研究的结果形成了各种建筑物安全设计的基础，诸如应急的、必需的和关键的设施，商业，财政和工业设施，政府设施和行政机关以及其他结构和系统等。对每种设施都要求不同的知识和不同的处理灾害的方法。例如，在普通房屋的设计中经济上的考虑是比较重要的，而对于应急设施，如消防站、警察局、医院以及急救中心，关键的因素是它们在地震后能立即继续起作用。对必需设施或生命线——包括给排水系统，煤气、电力、燃料分配系统，通信系统——主要考虑的是可以修复使用，而对公众没有严重影响。大坝、核电厂、石油设施、海洋平台、液化天然气贮罐、化学及生物学设备等关键性设施，失去控制将带来严重后果，因此安全性考虑是压倒一切的。商业、财政和工业设施是大城市的关键组成部分，必须加以保护，免遭严重的长期瘫痪。政府设施和行政机关，包括军用机场、海军装备、陆军设施以及政府通讯系统，必须保护其不受严重破坏或尽快恢复运转。

地震工程是一个相当新的领域。50年前的建筑规范没有列入抗震要求，没有强震记录，对工科学学生的教育不包括地震对结构影响的任何材料，那时地震工程知识实际上尚不存在。在Charles Derleth教授关于1906年旧金山地震房屋震害的文章中（见*Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1907年）谈到，“企图计算地震应力是无用的。这种计算会导致毫无实际价值的结论”。直到1933年3月10日加利福尼亚州长滩破坏性地震发生前，这一直是普遍的看法。实际上，在美国，地震工程这个领域可以说是在那天下午5点54分诞生的，当时这个6.2级地震夺去了几百人的生命，造成约6亿美元（1982价值）的损失，引起了立法者和政府官员对这个问题的强烈关注。

长滩地震后，西海岸的大学执行了一些研究项目，但这些工作由于第二次世界大战而中断，直到50年代才重新开始。在国家科学基金会开始资助研究时，一个有效的地震工程研究计划才得以出现。

地震工程研究的效益，大部分可归因于这样的事实，即人们对这个课题知道得很少。知识的每一步增长几乎都适应了一定的实际需要，而且重点工程如核电厂、高层建筑、海洋平台、大坝、液态气贮罐、油管等的规划、设计和建造，都对地震工程知识提出了特别的要求，这些需求的增长速度超过了研究工作进展的速度。

本报告所论述的主要是基本的地震工程研究，目的在于发展关于破坏性地震的发生与形成，关于地面运动的性质，关于人工结构物在地震时的性态，关于结构地震反应的分析方法，关于材料和结构构件的动力性能，关于土动力学和土工结构，以及关于都市安全和福利等方面的有关知识，工程机构和政府部门接着利用这些知识发展更好的抗震工程和防震方法。

当评价地震工程研究效果的时候，有两种不同的途径可供采用，一种是评议研究报告和出版的文章并主观地判断哪些对地震



1933年3月10日发生在加州长滩的6.3级地震毁坏了许多校舍，如照片所示的这所中学。这次地震发生在一个星期五下午的晚些时候，学校里没有学生，而在别的建筑物里死亡了大约200人。这次地震标志着美国地震工程研究的开始

工程知识作出了有价值的贡献。然而，本报告不采用这种方法，而是辨别处理地震问题时有实际应用的进展，这对进行客观的评价是有好处的。尽管这样做有可能忽视那些尚未达到实际应用水平的有价值的研究。

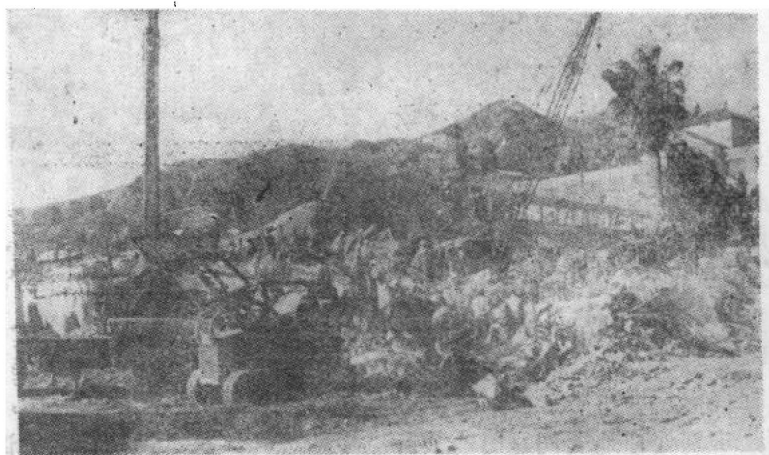
**导论**这一章概括了后面几章中的材料，并叙述在那几章所提到的较为重要的建议。

## 地震问题

论述地震问题的一种途径是说明地震工程研究旨在减轻将来的灾害，即减少生命损失、经济损失、对社会不利的冲击以及对政府和军事工作的冲击等。未来灾害的可能性对从事地震问题提

供了强大的动力，在这方面它与大多数工程研究不同，后者旨在提供社会利益但又不那么明显地企图防止重大灾害。

三个物理条件确定一次地震灾害的发生。首先是地震震级，因为一个小地震不会有足以引起广泛破坏的强烈地面运动。事实上，在美国的强地震区，引起明显破坏要有大于里氏震级5.5的地震。其次，震源必须离城市足够近，因在远距离外地面运动将衰减到低于严重破坏的水平。第三，灾害的可能性取决于对地震的防备程度。设防不好的城市将较设防好的城市多吃苦头。很明显，地震愈大、愈近，防备工作愈差，带来的灾害将愈大。



图为1971年加州旧金山地震中倒塌的悉尔马退役军人管理局医院。倒塌时死亡49人，16人在废墟中被挖出来而幸存。此照片是在震后2个半小时当最后一位幸存者被挖出来时拍摄的

一个严重的地震灾害的例子是1976年7月28日摧毁中国唐山市的地震。这个工业城市位于北京以东100公里，人口近百万。中国建筑规范将唐山划为不必进行抗震设计的地区，因此该城市的无筋砖房几乎完全没有设防。沿着大约140公里长的断层滑动所引起的7.8级地震是一个很大的事件。震中位于市内而且断层滑动范围超过市区的两侧边界。因此这个非常大的在离几乎没有

防备的城市非常近的地方发生的地震造成了非常大的灾害。85%的房屋倒塌或严重破坏,几十万人丧生。唐山的工业,包括钢厂、水泥厂、机车厂和煤矿长期不能运转,直到1982年只重建了这个城市的一半。

在城市居民中造成三分之一死亡的这样大的地震灾害,并不是没有先例的。一个类似的灾害(虽然规模较小)于1960年2月29日袭击了摩洛哥毫无防备的阿加地尔市(人口30000),震源位于该城镇下面的一个5.7级地震使10000人致死。幸而世界上多数地震不在城市附近发生,所以虽然引起一些破坏和死亡,但不致于造成灾难。然而未来地震在城市附近发生的可能性仍对地震工程研究起着强烈的推动作用。大的但并不频繁的地震已在美国中西部和东部发生过(1811—1812年在密苏里州新马德里,1886年在南卡罗利纳州查里斯顿),由于这些地区的城市防备很差,因此那里比防备较好的美国西部潜伏着更大灾难的可能性。

虽然在理论上有可能建设一个设防很好的城市,在最强地震作用下仍可免于破坏,然而实际上即使所有需要的知识都能够得到也是不会这样做的,比如核电厂设计成能承受最大预期地震,则需要大量的而且复杂的工程量,必然造成保守的判断,使结构物和设备造价相对提高。如果一个城市的结构物都要彻底研究和分析并作保守的设计,则将没有足够的工程师去完成所需的工作量,而且建筑造价的增加,将大大削减能建的结构数量。因此必须采用不同的观点对待地震问题,结构设计应建立在考虑震害程度、破坏后果和总造价的基础上。因为大地震发生不如小地震频繁,而且对任何地震,强震区的面积总比中等地震区或弱震区小。结构在使用寿命内经受很强地震的概率较经受中强地震的概率要小。所以经济上的考虑指出,可以有“可接受的损坏”,其长期修理费用小于使建筑物不致损坏的费用。

可接受的损坏其概念包含金钱的损失,但生命损失一般是不能接受的。广泛的考虑将会指出,一个城市的可接受的损坏应该

不经常发生，而且对居民不应有过分严重的打击。从国家来考虑，可接受的损坏不应対重要的政府部门，军事设施等有严重冲击。有必要对此进行研究，以确定什么是可接受的损坏，以及如何设计才能达到此目的。

## 地震工程研究成果的应用

地震工程研究成果广泛地应用于保护生命财产和减轻对社会不利的冲击上。因此地震工程研究成果的用户是我们工业化社会的所有个人和团体。地震给社会带来不利的影响，因此必须考虑防震或减轻地震灾害。地震工程研究的最终受益者是这个国家的公民，但马上使用研究成果的是关心地震灾害的各种行业、工业和政府部门。

地震工程研究可分为两类：

(1) 立刻付诸实际应用的研究。例如核电厂的电开关设备能否承受强烈地震？这个问题要由设备制造者或为设备制造者进行的应用研究予以回答，本报告不考虑这种情况。

(2) 为进行应用研究或发展设计方法提供所需知识或数据的更基本的研究。

地震工程基本研究的成果最终是能够找到实际用处的，虽然成果被完全使用之前可能要隔很长的时间。基础研究导致实际应用通常有如下途径：特殊设施如核电厂、大坝、海洋钻井平台，50层或更高的高层建筑的业主、计划者和设计者通常认为使用研究成果能得到好处，他们通过评阅技术出版物并和研究人员互相交流，把这些成果集中起来；在关键设施和技术性高的工程使用过这些成果之后，这个技术发展水平就渗透到建筑规范，工业规范和其它标准所管辖的一般监修的结构物和设备的设计中；最后，通过在建筑规范中高度简化的要求影响到非监修的结构物，如单层住宅等。建设者遵照规范去做但不必知道为什么要这样做。

研究成果被用于关键设施的延迟时间，典型的大约是1—3



年，研究成果反映到建筑规范和其他规范通常要5—10年或更长的时间。对非监修的结构物，延迟时间可能更长。

下面是地震工程研究成果用于特别设施的一些例子。

### 1. 高层建筑

很高的高层建筑住人很多，一幢建筑物内有上万人，每幢花费的投资有2亿美元。因此，业主通常要求所用的抗震分析和设计方法要建立在最新的有关研究成果的基础上。例如在洛杉矶设计40—60层的高层建筑，地震危险度评定估计了区域地震断层可能引起的地面运动的性质和烈度，用数字计算机进行动力分析确定结构对地面运动可能有振动反应。然后对建筑物进行设计使结构部件能适应算出的应力和应变。在其它城市也进行了类似的抗震设计。实际上，这样的结构物可以说在施工前已成功地经历了几次强烈地震。高层建筑的这些抗震设计方法已走在建筑规范要求的前面，并通过与研究人员的协作而得到发展。

### 2. 大坝

失事的灾难性后果要求对大坝进行细心的抗震分析和设计。例如耗资50亿美元的加州菲德尔给水工程（将水从菲德尔河引向南加州）的坝都座落在高烈度地震区，接受过以研究成果为基础的先进的抗震分析和设计。以往15年，加州水资源部设有地震分析顾问委员会，主要由大学里的研究人员把他们最新的研究成果带给坝工设计者。美国垦务局、美国陆军工程师团和其他组织在美国许多地方的坝工设计中也照样利用地震工程的研究成果。这些设计方法正在世界各地采用。若无地震工程研究所发展起来的知识，这样做是不可能的。

加州现有的1000多座坝提出了一个特殊的问题。这些坝大部分是在地震工程得到发展以前修建的，其抗震能力不得而知，加州坝安全部现正进行一项计划，采用动力法抗震分析和有关研究成果对这些坝的安全进行评价。当然，美国其他地震区也有许多坝给州政府提出特殊问题。