

国际地震工程协会简史

P. Gülkan R. Reitherman

引言

很幸运总有一些目光长远、勤勤恳恳、积极努力的人，团结同辈，用严肃的和科学的态度面对科学疑难，解决那些威胁我们生命和幸福生活的难题。这些过程并非一蹴而就，而必须等待时机成熟，与其他科学和社会的进步步伐相一致才能实现。我们的保护性措施可以抵抗一些自然之力，但我们必须从实践经验中不断学习，并依托确正的理论，来谨慎地为社区提供建筑环境的安全措施。纪念 1906 年旧金山特大地震 50 周年之际，在 1956 年的加州伯克利召开的世界地震工程会议开幕式上提出了上述观点。

1960 年东京举办的第二届世界地震工程会议上，经过优秀工程师们的讨论，于 1962 年成立了国际地震工程协会(IAEE)。至今，时光已过去了半个世纪，它通过国际协作，组织各国专家，致力于实现全球地震安全，现在是时候来回顾它的历史与成就了。

国际地震工程协会完全可以引以为豪的是，地震工程研究在朝着实现其既定目标的

过程中逐步积累了大量知识：通过知识、观点、研究成果的推广交流和实践经验的共享，切实消除地震灾害风险。确实，我们可以骄傲的宣称：历史上首次我们可以用知识与技术按照地震安全的愿景创造一个不同的世界(既不是依靠必要的财富、人的觉悟，也不是政治意愿)。然而，地震仍在许多国家肆虐。仅在过去一年半的时间内，全球已经经历了 10 余次大地震，其中的 4 次给海地、智利、新西兰和日本等国家造成了深远的影响。通过地震灾害调查我们欣慰地发现，有些国家应用地震工程知识取得了更好的建筑抗震效果，如智利。但放眼全球，情况却不乐观，仍有大量悬而未决的问题摆在我们面前。对于许多准备不足的国家而言，地震仍是其最可怕的梦魇，现实的严峻是无法被华丽的言语掩盖的。在人员伤亡、建筑环境的破坏都控制在可接受的水平，我们从而高枕无忧之前，仍有许多问题亟待解决。地震仍在按照自然规律发生着，但国家和人类似乎遭受了更大的损失。这是因为当今社会财富越来越多，且城市住宅和越来越多的人口处在了地震危险区。

1 半个世纪回首

地震科学是全球性的学科,没有政治和自然边界之分,2004 年造成 10 多个国家生命和财产损失的印度洋特大地震和海啸就证明了这一点。因此它最适合通过有效的国际合作来开展研究。国际地震工程协会定位为一个针对减轻地震灾害研究成果的知识进行传播的组织,其中各个成员国协会作为它的分支机构。地震工程师们共同努力获得的理论、实验结果和实践经验,将为各国政府的明智决策提供帮助。当然,研究是从需求出发的,而不仅仅为了在四年一度的世界地震工程会议(WCEE)上与同行交流,但该大会最大程度汇集了从事减轻地震灾害风险的各个研究领域的专家。他们来自世界的各个角落,这可以从世界地震工程会议举办地的辽阔地理分布看出(图 1。世界地震工程会议至今所收录的全部论文已由位于坎普尔的印度理工学院中的国家地震工程信息中心数字化并可在其网站 www.nicee.org/wcee 搜索到,也可在国际地震工程协会网站 www.iaee.or.jp 看到)。

本文主要讲述国际地震工程协会自身的历史,地震工程的历史并非重点。限于篇幅,我们在本文中主要着眼于国际地震工程协会在地震工程发展中的作用。Bertero 与 Bozorgnia(2004)、Freeman(1932)、Hudson(1992)、Reitherman(2012),以及 Scawthorn(2003)均介绍过国际地震工程科学与技术的发展史。由国际地震工程协会组织的大会四年一度的参加人数现在已经数以千计,但对在该协会产生过程中发挥关键作用的前辈却知者甚少。早年参加最初两届地震工程协会并继而建立国际地震工程协会的学者之间通过交流萌生的一些观点以及早期的历史是我们这里关注的重点。半个世纪之后的现在已经很难准确地重现过去,因为这并非重拾几个文件或轶事那么简单。但 George W. Housner(图 2)在接受《地震工程研究学会口述历史系列》的记者采访时,除了生动地描述了当时的情景外,还讲述了该协会发展的历程。



图 1 世界地震工程会议主办城市位置

国际地震工程协会与美国地震学会 (SSA) 一样都是成立于 1906 年旧金山大地震之后, 但前者相对晚些, 因为是旧金山大地震 50 周年纪念活动促使举办了世界地震工程大会。为了完整起见, 我们将从 60 多年前国际地震工程协会的起源开始回顾其历史。

在 Lydik S. Jacobsen (1897 ~ 1976)、George W. Housner (1910 ~ 2008)、John A. Blume(1909~2002)等人的领导下, 1948 年由 12 个“致力于服务工程地震学领域公共福利”的人组建了地震工程研究学会 (EERI)。其目的是推动研究地震作用下建筑物失效的原因及方式, 以及在如何经济有效地减少损失和人员伤亡方面研究方法并扩大地震工程知识的宣传。Housner 在 Jacobsen 1949 年的一年任期后, 在 1950~1951 年期间担任该地震工程研究学会的第一届副主席和第二届主席。随后在 1954~1965 期间 Housner 又连续十一年任该学会主席, 在此期间他的首要工作之一就是帮助组织 1956 年在加州大学伯克利分校举办的世界地

震工程会议。因为当时举办者还不能确定能连续举办, 甚至无法确定这次会议是否会成功, 因此第一届会议并未被冠以“第一届世界地震工程会议”。Housner 在长期担任主席期间指引了地震工程研究学会的最初发展, 使地震工程研究学会由一个规模很小、仅仅重点研究结构振动和强震动方面的组织, 变成了如今研究领域更大, 更广阔的组织。通过与 Kiyoshi Muto(1903~1989)教授牵头下的日本地震工程研究人员的合作, Housner 教授还在 1962 年帮助成立了国际地震工程协会 (IAEE), 并在 1969 年至 1973 年期间担任该协会的主席。Housner 被公认为地震工程学之父 (Jennings, 2009), 但他总是谦虚地认为 Kiyoshi Muto (图 3) 是国际地震工程协会之父。当然 Muto 对协会的组建功不可没, 这一点我们将



图 2 George W. Housner



图 3 Kiyoshi Muto

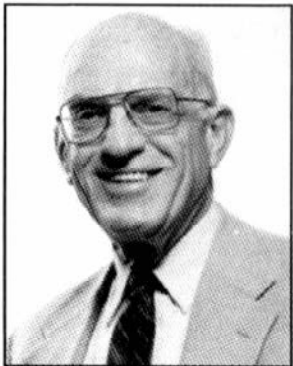


图 4 Ray Clough

在第 3 章叙述。但我们不应忘记 Housner, 他即便是不再担任主席之后仍深深影响着地震工程研究学会和国际地震工程协会的发展。他作为资深专家参加国际地震工程协会的活动多年。

我们的组织负责主办世界地震工程会议, 并推动世界地震工程学的相关科研活动。此外, 在 Housner 教授担任主席期间, 还创办了国际地震工程协会的官方期刊——《地震工程与结构动力学》, Ray Clough 教授(图 4)为首任编辑, 1972 年出版了首期。

2 地震安全：共同目标，任重道远

现在很难说清楚是由谁在什么时间创造了“地震工程(earthquake engineering)”这个词汇。在地震工程研究学会(EERI)作为一个非营利性组织于1948年11月4日在美国加利福尼亚创立并于1949年开始运行的时候,名字中的“地震工程”原本要表示的意思是地震问题相关的工程应用。“地震工程”出现之前大家使用“工程地震学(engineering seismology)”这个词。地震工程研究学会成立初期除了关注工程学(engineering)还关注地震学(seismology),当时地震学关注强地面运动本身而地震工程还只是其一个小分支。直至今日,地震学家真正关心的仍是地震所传达出的地球内部信息,而在地震工程领域,地震在地球表面的破坏效应才是研究的重点。

地震工程学科作为如今我们所知如此宽广的一个科技发展领域的出现,自然经历了几十年,并得益于计算科学、信息技术的发展,以及由航空工程和机械工程衍生而来的非弹性特性、动力学及统计学方面的发展。当然一些特殊的地震也是其中一个重要的影响因素,因为这些地震不仅仅引起了破坏,而且是发生在产出工程研究结果并出台相关政策的正确时间和正确地点。

在1960年代和1970年代发生几次破坏性地震(1964年阿拉斯加地震、1964年新潟地震、1967年加拉加斯地震、1971年圣费尔南多地震)之后,协会明确的目标是:通过促进地震工程广泛领域的科学家、工程师和其他相关专家的国际合作,加强知识、观点、研究成果和实践经验等方面的交流,减少全世界的地震灾害风险。在这种意义上,地震工程领域如今已扩展到包括经济和社会

科学。从一开始,世界地震工程大会的论文集就被定位为权威的信息来源,提供给从事减轻地震损失工作的各种专业人员。这些人包括专业人员和研究人员,有工程师(土木、结构、力学及岩土方面)、建筑师、城市规划师、地球科学家(包括地质学家、地球物理学家、地震学家)、政府官员以及社会学家。论文集中收录的文章所涉及的内容非常广泛,包括地震对社会的短期或者长期影响,地震前的社会形态怎样影响地震中人们的伤害或反应,以及在地震工程总标题下目前固定设置栏目中包括的课题。尽管各个学科都有许多可以发表论文的学术性期刊,然而世界地震工程大会的论文集依然是汇聚不同地震安全从业者的最新研究成果和实践经验的主要平台。

2.1 地震安全的组成

现在必须要回答的一个现实问题是:半个世纪以来,地震工程已能提升全球的地震安全水平吗?答案是肯定的,由国际地震工程协会实现的地震专业人员网络组织、他们使用的工具、诸如国际地震工程协会等的全球组织,以及在联合国领导的“兵库行动框架”内制定的政府行动,这些都使我们感到安慰,我们已不像一个世纪前的祖先们遭遇地震威胁时那样脆弱了。然而,在快速回答这个问题之前,我们先考虑如下恳请回答的假设性问题。

假设某人计划买房子而想要了解该城市的灾害风险。这个人如今可有更多的信息供参考,以便做出投资的决策。此类问题可以在互联网上找到很好的解决方法,许多类似的基本问题都可以迎刃而解。

假设某岩土工程师开展某地的场地效应分析时,为了定义参考地震动而想要计算该地的基岩地震动。在某些地方,就可以提供合理准确的数字来满足这种需求。信息量的差别也很大,像美国这样的国家,可以通过输入地理坐标进行在线查询来获得答案,而在一些至今还没有开展这种背景研究的其他国家或地区则不能如此得到答案。这同样适用于在地震活动区域内负责设计桥梁的工程师,以及那些想计算某时段内的最大谱烈度和会影响基底的砂土液化或滑坡的发生概率而开展地震动危险性评估的人员。工程师需要做的额外工作可能仅限于确定局部地质条件的设计参数,然后将这些设计参数纳入到计算中来验证设计的准确性。实际上,结构工程师可以使用我们现代的知识和计算机资源,在施工之前,针对不同的地震可能情况来进行结构设计并改进。

城市规划师经常需要计算某一建筑类型在某一区域内的风险分布图,从而确定这个城市具有较高风险水平的地区。或者再保险公司想要计算出公司业务量中建筑物的年平均损失和可能的最大损失。我们已开发出的工具可以为该领域大多数理性决策提供答案。同样,对于从事民防工程或应急管理的官员来说,针对某灾害反应规划中预设的地震,想要看到某一城市范围内可能的破坏和死亡分布情况,现在可以较为准确并针对某些特定区域得到这种问题的初步估计。

如果依据地震负面影响来定义安全性,那么实现这一困难目标的工具已经够了吗?从震后影像我们可以看到塌落的建筑、错动的桥墩、失效的公共系统以及许多其他令人悲哀的惨状。地震工程的工具已经能够为世界上的大部分居民减轻这些痛苦了吗?政府

已经将半个世纪以来地震专家们开发的工具转化为可以保护人民安全的政策了吗?显然我们无法肯定地回答这些问题,不仅因为任何国家都无法达到绝对安全,还因为其他社会需求通常优先于像地震这种小概率的突发事件。大多数情况下,破坏性地震的复发间隔要长于人类的记忆,我们大多数人由于缺乏遭遇强烈地震动的经验而只关注自己的日常生活,即使是生活在地震危险区域的人们亦是如此。结构加固技术已经比较成熟,然而大众没有足够的意愿做出必要的让步来保护其财产不受损坏。一些机构和政府在做出某些决策时也遇到了同样的问题。对危险的公共基础设施、医院、学校以及其他重要设施的重建,经常忽略这些设施经济生命到期后的自然重建过程,或者忽略未通过实际地震检验的建筑就应淘汰的达尔文法则。许多国家没有能力对数目庞大的已建建筑进行评估、调查和必要的改造。许多情况下,根据现代地震工程的要求来建设,才是一个站得住脚的或者说现实的政策。认为世界上大多数城市地震休眠期为 50 年,并按照目前的建筑安全措施来施工,这样仅仅有助于减少城市小部分潜在损失。目前正在建设和使用的并不完备的抗震建筑,实际上为未来埋下了许多的隐患。

国际地震工程协会不能因为在提高全球地震安全方面所做的工作而将功劳独揽。科学技术某一特定领域的研究和发展存在自身的随机性,不一定按照预先设定的方向前进。这是由于在不同刺激诱因下,人的动机和目的并不相同,驱动力与探索欲也会不同。过去的半个世纪国际地震工程协会已成为这种进步的一种催化剂。它的使命一如既往,但在未来几年内会采用新的规模和形式,其中有些现在还难以预测。

3 国际地震工程协会建立和发展回顾

近代的首届地震工程会议于 1952 年在洛杉矶举行，会议议题还包括爆炸对于结构的影响 (Proceedings of the Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structure, Earthquake Engineering Research institute, Oakland, CA. 1952)。会议虽然由地震工程研究所举办，但爆炸学科也被列入了议题，主要是考虑到如果仅涉及地震工程议题会因为参会者不足而无法形成一个会议。随后 1956 年在旧金山举办的会议就仅仅涉及地震工程，这次会议是为了纪念 1906 年加利福尼亚北部地震发生 50 周年。组织者将这次会议命名为“世界地震工程会议” (World Conference on Earthquake Engineering)，主要是因为邀请了各国专家参会。140 位参会者递交了 40 篇文章，图 5 给出了他们在加州大学伯克利分校惠勒馆前的留念合影，可以看出与现在有几千人参加的会议有明显差异。1956 年的这次会议被视为首届世界地震工程会议。

这次会议的日本代表团由东京大学的

Kiyoshi Muto 教授率领，他为自己的国家提出志愿在日本筹办下一届会议。他强烈建议应该建立一个国际性协会，且与会代表都一致表示应该建立一个地震工程领域的国际性组织。于是一个由 27 个参会国家代表组成的会议筹办委员会成立了，Kiyoshi Muto 教授被推举为委员会主席。他认命来自秘鲁、葡萄牙、土耳其、美国、苏联和日本的代表成立了一个指导委员会，来为建立筹办委员会制定计划。但是，这个组织应该是由许多国家的个人组成呢还是应该是一个各国协会的联合体呢？最后，应该由各国协会组成的观点占了上风，因为各国的地震工程问题各不相同，各自应该有自己的团体组织并且遵照各自的指导方针。这一原则一直沿用至今。

伯克利和东京会议参会者之间初步的会议交流促成了国际地震工程学会 (IAEE) 的成立。1961 年 5 月开始筹备国际地震工程协会的章程以推进审查与评阅指导委员会的建立。章程于 1961 年 12 月修订完毕并于



图 5 首届世界地震工程会议代表合影，1956 年 6 月

1962 年 2 月被指导委员会同意并采纳。章程规定每个国家须成立国家级协会或学会并命名一个理事和一个副理事代表其国家。为了能够使国际地震工程协会尽可能地正常发挥其功能,1963 年 1 月选举产生了执行委员会并任命了主席、副主席、秘书长和八位执行理事。自协会建立以来总部一直设在东京,因此秘书长始终来自日本。学会的章程在 1961 年制定后已经经过多次修订,当前版本可在国际地震工程协会的网站(www.iaee.or.jp)浏览。从 2000 年开始,章程通过修订规定主席选举过程在两届连续的世界会议中间进行。从 2010 年开始,国际地震工程协会在日本注册为一个非营利性组织。

学会于 1963 年 2 月 1 日开始运行,核心办公区位于国际地震学与地震工程研究所(IISEE),该研究所由联合国和日本政府联合建立,设在东京的建筑研究所(BRI)之内,后来迁移到了筑波市。从 1963 年到 1977 年,工程师 Kazuo (John) Minami

(1907~1984)在其东京的办公室提供了国际地震工程协会的联络中枢。

从一开始,协会的目标一直是“通过加强地震工程领域的科学家和工程师在知识、观点、研究成果以及实践经验等方面的交流来提升这一领域在国际间的相互合作”。这一目标以举办世界会议的形式,通过信息交流、扩大技术合作来完成。协会同意与联合国教科文组织(UNESCO)合作,致力于降低地震破坏和保护人民生命安全,在 1964 年参加了由联合国教科文组织召集的关于地震学和地震工程学的政府间会议,并制定了在强震之后向震区派遣地震应急考察团队的计划。

目前,共有 56 个国家加入了国际地震工程协会。协会由主席、执行副主席、副主席、当选主席、上任主席和秘书长管理,其执行委员会由 11 人组成,其中 8 人通过大会选举产生,其他 3 人由执行委员会内部选出。

4 世界地震安全计划和其他全球性项目

国际减灾十年(IDNDR)的概念最初是 1984 年由时任美国科学院主席的 Frank Press 在旧金山举办的第八届世界地震工程会议的开幕式上提出的。这一思想在 1987 年演变成了联合国决议,并于 1990 年 1 月 1 日开始实施第一个十年计划。

国际地震工程协会是地震工程领域国际性的学术权威组织,一直感觉在实现国际减灾十年目标方面有扮演积极作用的不可推卸的职责。在 1992 年马德里的第十届世界地震工程会议上,国际地震工程协会做出了一个重要决定,通过设立作为国际地震工程协会一项任务的世界地震安全计划(World Seismic Safety Initiative,简称 WSSI)更紧密地参与国际减灾十年项目。为此首先成立了一个由 7 个成员组成的临时委员会,由国际地震工程协会的时任秘书长片山恒雄(Tsuneo Katayama)和斯坦福大学的 Haresh C. Shah 担任联合主席。

世界地震安全计划得到了国际地震工程

协会执行委员会的获准,并且形成了得到大家认可的大会决议。1993 年 1 月它还被国际减灾十年科学与技术委员会批准为一个国际区域性的国际减灾十年项目。

在董事会成员被任命之前,因建立世界地震安全计划的工作需要,1993 年 2 月成立了世界地震安全计划临时组织委员会(WIOC),成员如下:

- Giuseppe Grandori(意大利)
- George Housner(美国)
- Wilfred Iwan(美国)
- Tsuneo Katayama, 联合主席, 国际地震工程协会秘书长(日本)
- Roberto Meli(墨西哥)
- Haresh Shah, 联合主席(美国)
- Charles Thiel(美国)
- Kenzo Toki(日本)

世界地震安全计划的理念是不从事不切合实际和不可控的项目,而是从事明确界定的区域性项目,参与项目的都是献身于实现

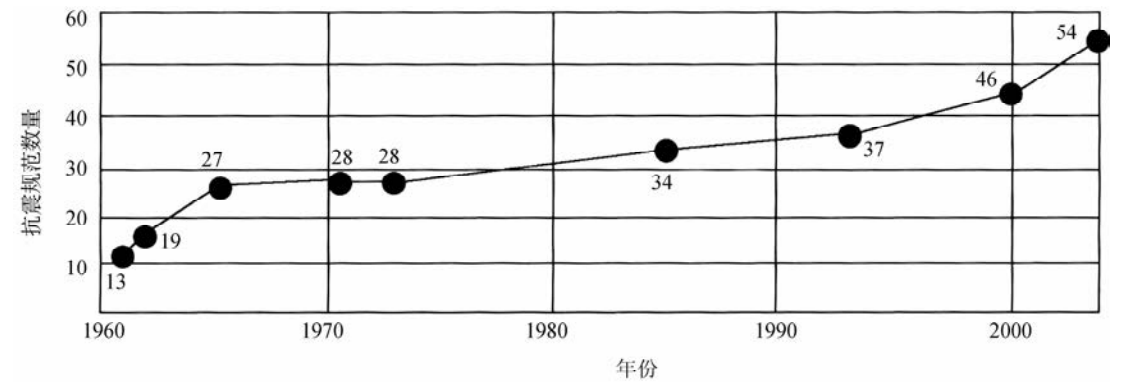


图 6 拥有抗震规范的国家数量。

—Robert Reitherman, Earthquakes and Engineers: An International History, ASCE Press, Reston, VA, 2012

国际减灾十年理想和世界地震安全计划目标的专家。自助是世界地震安全计划项目建立的基础。世界地震安全计划始终致力于增强人们的意识和帮助其在地震中保护生命财产的安全，但显然现在相关的知识并未发挥最大的作用。世界地震安全计划承诺将会集中精力实现这一目标并竭尽全力来帮助国际社会进行防灾减灾。世界地震安全计划需要每个人的帮助来实现这一目标，目前其总部位于新加坡南洋理工大学。

国际地震工程协会的另一项目是全球地震模型(GEM)，它有一个使目前较先进的地震灾害风险模型通过互联网(www.globalquakemodel.org)广泛传播并应用的宏大目标。公众一个人的伙伴关系是

全球地震模型的基础，可促进人们在开发和应用全球地震灾害风险评估工具与资源时相互协作。成百的组织和个人专家、教授和相关从业者同时采用全球统一的数据库、方法、工具和开源软件进行工作。全球地震模型通过整合全球资源以及区域性项目来实现其目标。

再往前追溯国际地震工程协会的历史，是编辑出版《抗震设计规程：世界列表》。该列表自 1960 年出版创刊版以来已更新了 10 次。图 6 显示了使用该《世界列表》中的抗震规范的国家数量增长趋势。1980 年国际地震工程协会出版了《抗震规范基础概念》，并在 1986 年通过修订出版了《非工程构造的抗震指南》，编辑是 Anand S. Arya。

5 世界地震工程会议

自从 1950 年代中期或更早些以来，地震工程方法已经大大改进。这门学科的发展和完善，足以从这 14 本国际地震工程协会论文集中看出端倪。如前所述，这些论文集里的很多论文可以从 www.nicee.org/wcee 网站下载。尽管通过调查世界地震工程会议的论文集概括出整个领域的进步是合乎逻辑的，但实践结果肯定不全面。因为这些论文集中有成千上万篇的论文(见图 7)，且主题十分宽泛，因此要想准确无误地做好这项工作会需要许多年。对会议上的任何一篇论文都无法用科学的尺度来量化其对后来地震工程发展的贡献，用其后来被引用的次数来衡量持久性也是不科学的。因为我们只能提及论文集中几篇里程碑式的论文，这对没提到的论文难免不公。这里必需提前声明的是，对任何一篇优秀的，或具有历史意义的论文的选择肯定会有些不确定因素在其中。原因

有以下几点：首先，国际地震工程协会的会议论文集并不是研究成果的唯一出版平台。在这些年中，地震工程领域创建了许多期刊。其次，在所引述的论文之前有某些论文确实值得在此提及，但是有可能由于我们的筛选不够细致导致了遗漏。最后，这里的排名或引用并不唯一，其他的形式也合理。基于公正性，我们将不公开姓名(除非很有必要)，同时也避免对特定卷数和页码的引用，或对论文电子版的引用，而且这种引用在这一简要概述中也不适宜。所以我们通过各种角度审视历届大会的论文集成果绘出的地震工程发展图至多是启发性的。这些论文勾勒出了地震工程中的重要转折的概况，但就像评选有史以来的最好画作、最有影响的小说或最卓越政客的成就一样，读者无论是阅读哪个年份的论文都要有一样的怀疑态度。

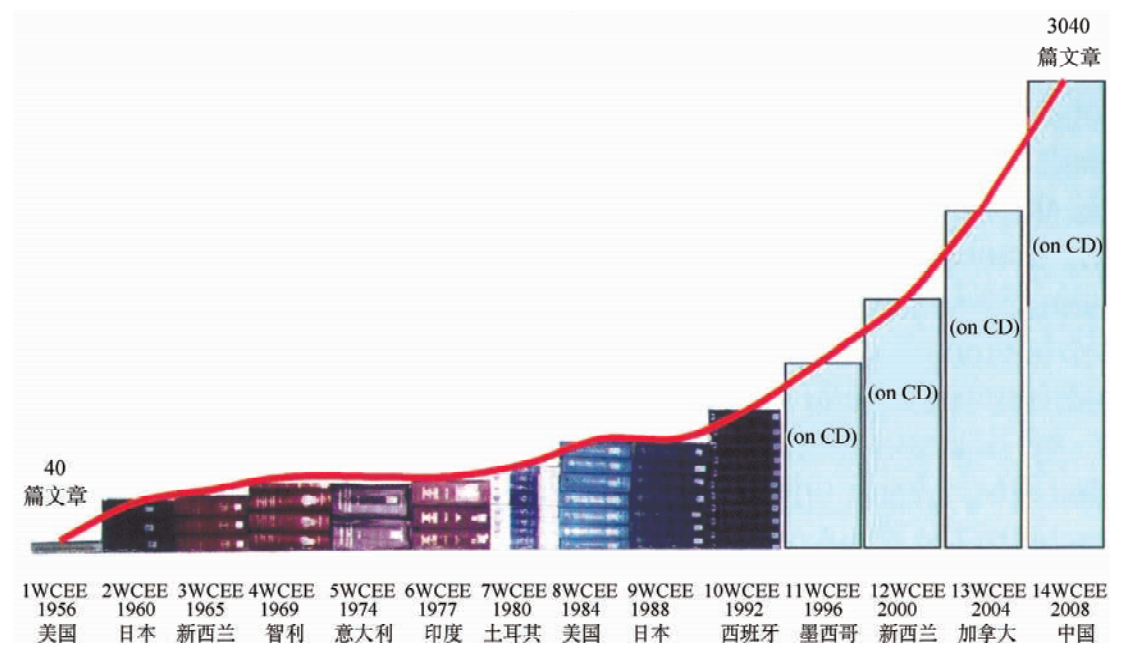


图 7 世界地震工程会议论文数量的快速增长

第一届世界地震工程会议：伯克利(1956)

基于对强震动下有限数量建筑物或其他结构性能的观测，Housner 迅速地写道，如果按照有限塑性变形假设成立，就允许将建筑物的安全强度设计成远小于观察的谱加速度对强度的要求。就这样非弹性设计原则诞生了。Rosenblueth 鉴别出了建筑上地震动产生的连续小波链的随机特性，并指出，概率论是计算所需反应的理想工具。来自许多国家的与会者报告了其抗震规范、强震观测计划、实验室实验、抗震建筑的理论发展，以及防灾减灾的社会措施评价。虽然与今日相比，那时候的主题显得局限，但首届世界地震工程会议的论文集仍然是今日地震工程领域的范例。

历史背景：1956 年的科技

该时代的地震工程师生活和工作在怎样的一个世界中呢？他们大脑中使用的概念有许多与今天所用的相同，这可由当年世界会议论文集的广阔范围说明。然而，与今天相比，那时的土木工程师和地震学家是用手计算，用铅笔和纸添加数据，用图解静力学，对许多较大数字的计算则操纵滑尺来完成，也会使用计算器，比如说 Curta（一种胡椒磨那样大小的机械，也有一个类似的曲柄）。直到 1970 年代，大多数工程师才有机会接触到性能强大的计算机，或者各种计算机。在 1956 年，计算机很笨重，通常只提供给某些政府部门、军队，以及大型银行。抗震设计是一种重复和创造性的过程，之后很久工程师个人才能使用台式机延伸其思路。1954 年晶体管收音机进入市场，只有某些少数研究计算机用晶体管取代真空管。1956 年 IBM 公司生产出了商用磁存储产品，其容量能达到 500 万字节。两年之前，IBM 公司推出了第一款成批生产的计算机（IBM 650），这里的“成批生产”指的是



450 台。直到 1956 年，麻省理工学院的研究人员才采用“直接输入”，就是现在我们通过计算机键盘输入指令这样简单的过程，这比手动开关和插线更进了一步。

以上事实表明，直到 1970 年代，领先的工程思路才带来理念上的突破，计算机技术变得更加强大并易于使用。1956 年发表了有关有限元方法的重要论文（Turner *et al.*, 1956）。其作者之一，Ray Clough，后来才将这个�方法命名为“有限元方法”（Clough, 1960），而他的名字也在地震工程史上变得著名。同其他创新一样，地震工程也借鉴了航空和机械工程等领域的知识。Clough 当时与 Turner 和波音飞机公司的其他研究人员一起致力于将有限元方法运用于分析喷气飞机机翼，而没有运用于解决地震工程问题。

1956 年教授们的参考书目以及课堂讲义仍然是油印机印制的紫字，复印仍然是昂贵奢侈的。当时出现了可预装一组幻灯片的

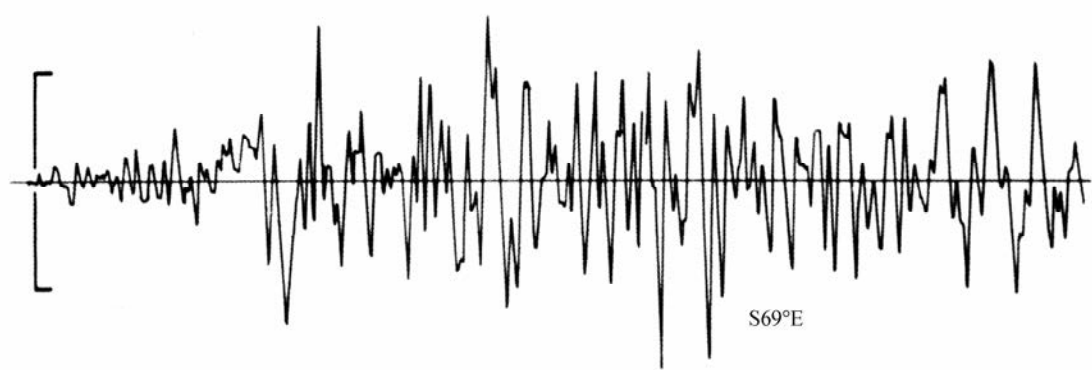


图 8 1952 年克恩县地震塔夫脱加速度图。
—加州大学伯克利分校国家地震工程信息服务与太平洋地震工程研究中心



图 9 1952 年克恩县地震。抗震设计的学校建筑表现性能良好，说明地震工程在良性发展轨道上。
—Karl Steinbrugge，加州大学伯克利分校国家地震工程信息服务与太平洋地震工程研究中心

幻灯片投影机，但是大多数课程仍在使用 1801 年发明的教育手段——黑板和粉笔。

历史背景：地震

当时发生的哪些地震给工程师提供了经

验和数据呢？1952 年发生在加利福尼亚州克恩县的地震提供了塔夫脱强震动记录(如图 8~9)，与 1940 年加利福尼亚州的埃尔森德罗记录一起被认为是到那时为止对研究人员最有用的记录，虽然现代的振动台还没

有在现场“重放”这些记录。Steinbrugge 和 Moran(1954)针对 1952 的地震活动做了勘察报告,包括地震学、应急响应、公用基础设施建设,以及详细的建筑性能统计,这可以与现在十几人共同写出的报告相媲美。在第一届世界地震工程会议之前的 4 年中,地震曾在土耳其(1953)、阿富汗(1954)和阿尔及利亚(1954)均造成一千多人死亡。鉴于地震工程主要目的是阻止这种灾害,因此以上这些冰冷的统计数字必须在地震工程中提及。相比之后的一段时间,如此规模的大地震灾难出现相对较少。第一届世界地震工程会议的成功举办并没有见诸新闻头版。

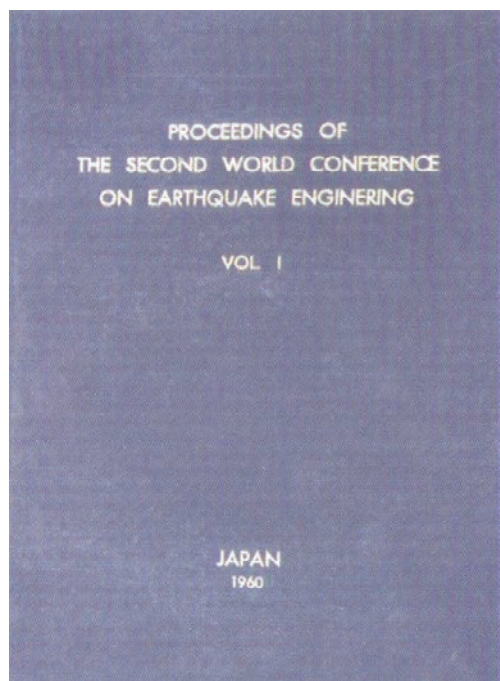
第二届世界地震工程会议:东京和京都(1960)

本届大会的论文集骤增至 2000 页,与会者多达 500 人,证实地震工程已成为一门即将进入增长期的学科。大会上对地震结构工程中最基本的概念,即单个框架以及后来的多层框架建筑的弹塑性理想化进行了激烈辩论。工程师们已经认识到,地震中结

构受力会超过弹性设计荷载,所以这意味着需要将之前设计理念中保持结构弹性的承载力提高。明显的解决方法是将结构非弹性化,因为在动态的环境中,结构可以来回振动但仍然保持性能。Veletos, Newmark, Housner, Blume 以及 Penzien 的论文以新的思路首次提出,与重力荷载这种静荷载作用不同,地震引起的短时非弹性变形如果可以控制,则结构不一定会失效。到目前为止,这个概念已经扩展到包括其他系统的领域,如土壤结构,并固定为基于性态的工程的研究方面。当时新的地质和岩土工程课题讨论了断层破裂的危险性(Tocher)和土在地震作用下的剪切强度(Seed)。

历史背景:1960 年的科技

此时,计算机技术稳步发展,但是功效仍旧太低,有太多的维护使其无法适用于大多数地震工程师。Clough 由于在这一时期作出的贡献,值得在这里被再次提及。Clough(1958)指出,“鲜见例外的是,土木工程结构的设计和分析中电子计算机的应用都非常有限……”。这时,不仅他参与研发的有限元方法,甚至反应谱方法都已被概念化,但这些方法并没有被广泛应用,因为计算机容量远远满足不了工程师的要求。也需要更大的地震动记录库。Kiyoshi Muto 和 Nathan Newmark(1910~1981)因在地震工程其他领域方面的成就,成为了领军人物,他们参与了高级计算机中心的研发。在东京大学, Muto 领导了强震反应分析计算机 SERAC 的开发。SERAC 是一款“可以计算五质量弹簧系统弹塑性响应的电子模拟计算机。随着数字计算机的发展,约 5 年之后,这种模拟计算机就被数字计算机所取代”(Otani, 2004)。在位于厄巴纳平原上的伊利诺伊大学, Newmark 是数字计算机实验室的主任,在 ILLIAC 2 代计算机的发展中发挥了重要作用。



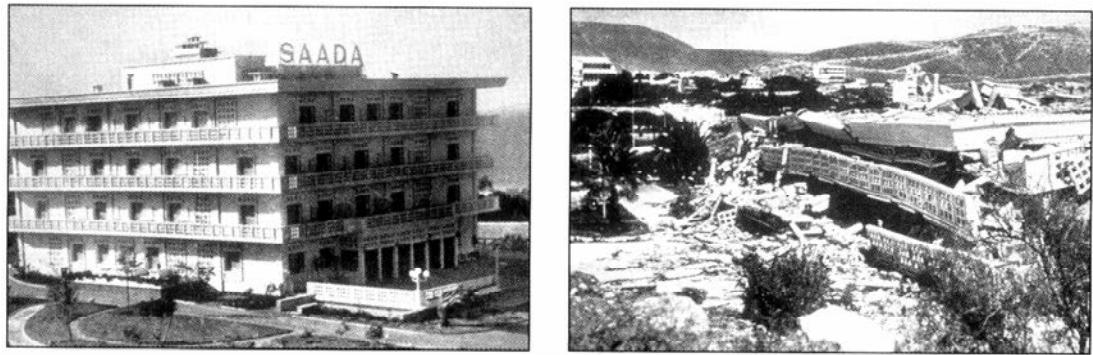


图 10 1960 年地震前后拍摄的摩洛哥阿加迪尔萨阿达 (Saada) 豪华酒店。
—美国地质调查局, 加州大学伯克利分校国家地震工程信息服务与太平洋地震工程研究中心

虽然苏联在 1957 年已证明可以把一个物体放在空间轨道上运行, 但将卫星实际应用于通信、在可视谱和不可视谱范围拍摄地球表面, 以及进行测量 (比如 GPS) 都是遥遥无期的。

1960 年代在地震地区建造了一批核电站、大坝以及高层建筑物。这些新的建造技术采用了地面运动和结构响应计算的最先进的分析方法, 复杂的方法慢慢步入了更广阔的地震工程实践中。

此时, 用于地震工程研究的资金还非常少。Clough 在这里值得再次提及, 他指出, 1956 年第二届世界地震工程会议后, “直到 1956、1957 年, 我才有机会进一步研究有限元方法, 那时我在挪威度过了我的第一个假期……”(他曾在挪威 Skipsteknisk Forskningsinstitutull 公司工作, 也就是现在的 MARINTAK 公司, 致力于船舶结构的研究。见 Clough, 1980)。如果这位在地震工程领域贡献最突出的人物当时都没有找到用于研究的资金, 那可想而知其他人的工作将是多么艰难。

历史背景：地震

在第一届与第二届世界地震工程会议之间的这段时间, 也是发生中等强度地震活动的时段, 造成至少 1 000 人死亡的地震有: 伊朗 3 次 (1957 年 2 次, 1962 年 1 次), 摩洛哥 1 次 (1960 年), 智利 1 次 (1960 年)。1960 年摩洛哥阿加迪尔地震 ($M5.9$) 在同规模小型地震中仍保持着最多死亡人数 (超过 13 000) 的记录。1960 年的智利地震, 自第一届世界地震工程会议之后引起工程界广泛关注达数十年之久, 仍然保持着现有地震记录震级的最大值 ($M9.5$)。值得注意且令人惋惜的是, 我们没有获得一条靠近这次特大地震的强震动记录, 对于发生在阿拉斯加的 3 个 9 级地震以及 2004 年的苏门答腊地震情况也是如此。

第三届世界地震工程会议：奥克兰和惠灵顿 (1965)

随着国际地震工程协会的逐渐健全, 这次会议首次批准采用毛利人的地震与火山之神的模型 Ruaumoko 作为协会的永恒标志。这尊木雕在每次世界地震工程大会开幕式上



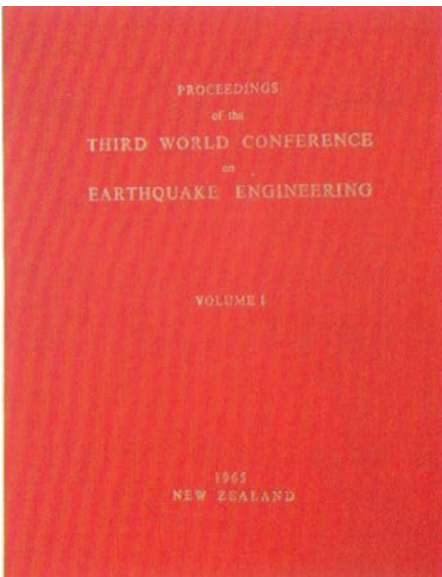
均摆放。Karl Steinbrugge, 当时地震工程研究所的主席, 在惠灵顿的国家博物馆, 即自治领博物馆, 现在称为 Te Papa, 看到了这尊 Ruaumoko 雕刻, 并委托一个名叫 Charlescurch 的毛利人木雕大师制作了一个复制品。他随后将它交给了在新西兰基督堂市的坎特伯雷大学代为保管。原件已经在第 14 届大会期间遗失, 现在的木雕是复刻品。

受坎尔森特罗地震(1940 年)和阿拉斯加地震(1964 年)(虽然没有强震记录)经验的启发, 并受需要回答断层迹附近的场地加速度峰值可能有多大的有趣问题的驱使, 又是 Housner 运用基础力学大胆给出了答案: 50% 的重力加速度不会是不合理的限值。我

们如今在世界各地均观测到超过这一值的记录, 但是他得出的结论是被试验和测量所肯定的, 比如其认为在强震动下的断层附近的运动并没有想象那么大, 而且受当地场地和波传播路径的影响可能会比远距离的小。在特定体系的非线性动力响应的概念提出后, Iwan 描述了关于单自由度双线性体系的滞后响应; Clough 与他的同事扩展了高层建筑地震响应的假设; Blume 的储能概念为依据材料塑性来减少弹性响应的理论埋下了伏笔, 这是日后基于位移的工程理论的核心概念。

历史背景: 1965 年的技术

在 1960 年代初, 有几种建筑趋势影响了地震工程。仅依靠承受弯矩的钢筋混凝土框架, 不设剪力墙, 这种结构非常普遍, 不仅在一到两层的建筑, 在某些城市还用于一些约 10 层左右高的公寓楼。波特兰水泥协会急于想为工程师提供一本规范以协助他们设计地震区的钢筋混凝土建筑物, 委托了 Blume、Newmark 和 Corning 准备这本设计规范(Blume *et al*, 1961)。混凝土倾斜面板施工的结构在美国西部变得非常普遍。自 19 世纪与 20 世纪之交, 采用铆接的钢结构桥梁和建筑物, 以及用于工业的钢框架结构开始出现, 但建筑框架经常包上混凝土。到第三届世界地震工程会议时, 焊接及螺栓连接取代了铆钉连接, 轻量级防火层取代了混凝土或砖石。几个世纪以来, 许多国家的建筑风格一直将柱作为重要的审美元素, 但从这个时代起, 柱子开始被最小化, 腾出宽广的空间, 从而有更长的跨度, 更多的容纳人数, 更少的占地面积。在许多国家, 建筑的蓬勃发展导致了地震工程领域的快速发展。有时候地震工程领域发展太快而不能得到建筑的可靠设计。



计算机世界开始了一种新的趋势: 计算



图 11 1964 年新潟地震中液化引起的土的承载强度的损失。

—Joseph Penzien, 加州大学伯克利分校国家地震工程信息服务与太平洋地震工程研究中心

机设备连接成网络，而不是独立的个体。1963 年，美国航空公司在 IBM 7090 计算机上运行的 SABRE 预订系统，共连接了 65 个城市中的 2 000 个终端。

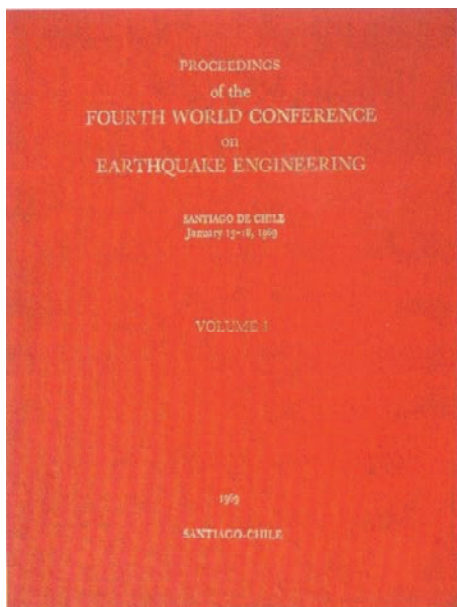
历史背景：地震

自第二届世界地震工程会议后的 4 年中，只发生了两次导致 1 000 人以上死亡的地震：伊朗(1962 年)和斯科普里(1963 年)。地震工程师在一个几乎没有头条新闻关注的领域默默耕耘。在这期间，有 2 次地震，即 1964 年的阿拉斯加地震和新潟地震，提供了很好的有关地震岩土工程研究的学习机会，而且正如后面所述，地震引起的液化问题第一次被人所关注。由于这些地震发生的时间在新西兰第三届世界地震工程会议召开前不久，所以在第三届地震工程大会的论文集中尚未包括有关于液化的文章。然而从这

一届开始，每一届世界地震工程会议的论文集中都有关于液化主题的广泛报道。

第四届世界地震工程会议：圣地亚哥(1969)

在 1960 年代，地震危险性评估、地震发生概率和地震灾害(地震危险性的结果)成为开始研发的重要活动领域，以满足关键设施、防灾和保险的设计要求。现在它们已成为地震工程工作研究和实施的重要组成部分。目前，灾害和危险性已有明确区分，但这两个术语在最初使用时为同义。该领域一些领军人物(Esteva 和 Vanmarcke)提交给第四届世界地震工程会议的论文是迄今获得的发展程度的好标度。Kanai 将地震动的速度认定为引起损害的一个很好的指标。非弹性系统的随机分析吸引了越来越多的关注，而 Ambraseys 认为地震动的最大速度肯定为 100cm/s 的量级，但是对高频的加速度



来说超过 $1g$ 也是有可能的。这次会议表明,使用振动台作为地震结构工程研究的工具已经成为现实 (Sozen, Bouwkamp, Clough, Rea), 另外,在大尺度结构试验中,通过现代化的检测设备和数据采集技术检验分析理论的适用性已经是一种趋势 (Umemura, Aoyama, Bertero, Bresler, Paulay, Park)。Idriss、Seed 和 Whitman 的论文中提出了将地震动力学的尺度引入到土沉积层的响应中。

历史背景: 1969 年的技术

计算机的能力对于大多数地震工程师尚不适用。虽然每年市场上推出一款具有更好功能和更低廉价格的计算机,但是计算机技术还没有开始其显著的增长阶段。此外,1960 年代,甚至是 1970 年代,都是由技术人员运行计算机的年代,而非用户直接使用的年代。在类似打字机的设备上对叠放的孔卡打孔,提供编程指令给主机,最后从计数器返回结果并打印输出,工程师才可用来进行细致的分析或设计。人们不得不学习一门计算机语言和编程技术,类似于学习一门外

语。在 1970 年代,一些改进计算机性能的发明已经问世,但是还是没有完全普及。在 1964 年,使用鼠标操作的图形化用户界面出现了。就在这一年的世界博览会上,索尼推出了一款能够运用晶体管的桌面计算机。其名为 SOBAX,意思是固态的算盘,虽然它在当时是先进的,但是与今天相比,似乎更像是算盘而非今日的手持计算器,更别说是台式电脑了。同年,在贝尔实验室的研究人员开发了 UNIX 计算机语言,但结构分析软件的发展稍早些,该软件随后迅速流行。互联网的先驱 APRA 网络在 1969 年研制出,即今日互联网的原始版本,但仅是一个工作原型。

1960 年代末,在地震工程创新技术方面处于领先地位的三个国家利用计算机化地震分析设计了下列高层建筑:日本东京 36 层的霞关大厦;新西兰奥克兰 20 层的公民行政大楼;美国旧金山 43 层的富国银行大厦和洛杉矶 40 层的联合银行大厦。

在这些年中,现代振动台地震模拟器开始取得进展,1967 年在伊利诺伊大学香槟分校使用着一台,1968 年在意大利的结构模型试验研究所 (ISMES) 使用着较小的一台。这一地震工程实验族树的分支可以追溯到 1893 年东京大学和 1906 年斯坦福大学的实验。从 1960 年代开始的现代振动台不仅比早前的具有更强大的功能,而且对于可模拟的地震动更加精确。1967 年日本科学城筑波市开始建设,并在 1970 年代拥有了主要的地震工程设施,而且今日仍是实验研究的中心。

历史背景: 地震

自上次世界地震工程会议之后发生超过 1 000 人死亡的地震有三次:土耳其(1966)、伊朗(1968)和中国(1969)。尽管与这些国家



图 12 一栋 11 层建筑完全倒塌，1967 年加拉加斯地震。
—加州大学伯克利分校国家地震工程信息服务与太平洋地震工程研究中心

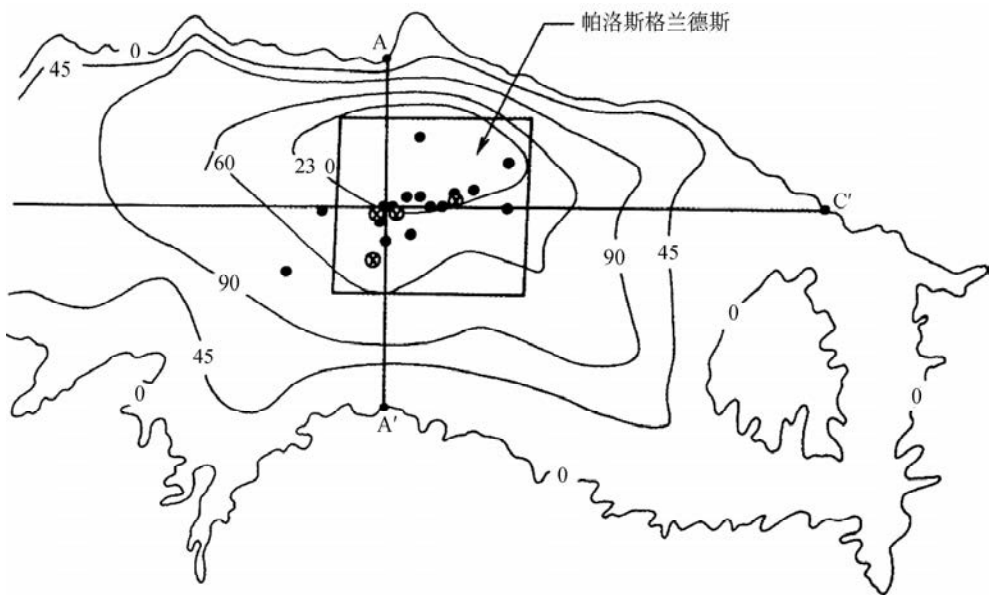


图 13 加拉加斯较高建筑物损坏与土壤深度的相关性。
—H. Bolton Seed, I. M. Idriss 和 H. Dezfulian, 1967 年 7 月 29 日加拉加斯地震中土壤条件与建筑破坏的关系；
—加州大学伯克利分校国家地震工程信息服务与太平洋地震工程研究中心

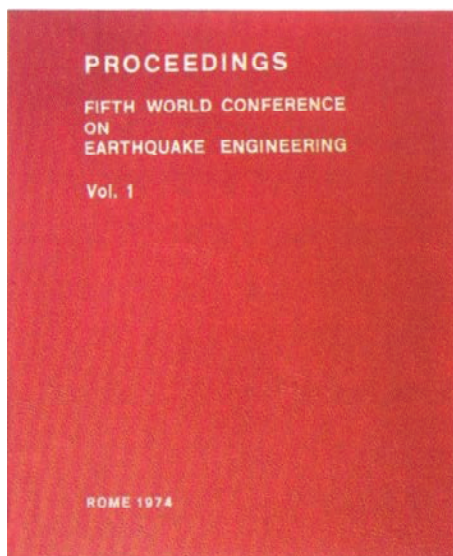
之前和之后发生的地震相比这些地震的生命损失相对不大,但在这些国家再次发生地震灾害说明了地震活动有发生在同一地点和人口扩张带来的风险,这是一个可持续数代的问题,直至地震工程的减灾措施贯彻落实。在这期间,1967 年加拉加斯地震也许是最有启发性的事件,因为它为结构工程师提供了中高层钢筋混凝土结构建筑倒塌方面的经验教训,而岩土工程师研究了引起地震动放大的土体效应。

第五届世界地震工程会议:罗马(1974)

结构系统的动力性能可以通过其振动期间的记录来判定。这是响应控制的必要知识,可通过逐次减少计算反应与测量反应之间差异的优化程序得到。在罗马这次会议提交的论文中我们看到了这种研究领域发展的迹象。Veletsos 对柔性壁储罐的地震反应进行了研究, Powell、Wilson 和 Bathe 的几篇论文重点研究了复杂体系的非弹性响应。Whitman 介绍了地震工程损伤概率的矩阵,是早期损失估计研究的概率发展结果。

历史背景:1974 年的科技

我们每天在电子邮件中看到的“at”的符号@,它的首次亮相是在 1971 年,不过对于大多数人来说,电子邮件直到 1980 年代或者 1990 年代初才可用,而对大多数工程师以及其他发送邮件需要的个人电脑和万维网实用工具到 1980 年代都没有批量生产。1972 年,麻省理工学院的学生们开发了一个名为太空战争的游戏,它仅仅是一个电脑游戏,并不是一个有用的工具,但是它表明一台电脑可以与人进行即时互动,并不需要技术人员在另一个房间内对打孔卡进行处理。通常将 1970 年做为地震工程和土木工程领域计算机软件发展史上的基准年,因为 Edward Wilson 在这一年开发出了 SAP 软件,他注释说“是迄今开发出的一个对复



杂结构体系进行线性弹性分析的最强大功能和高效的程序。不过,我确信它将在 5 年之内过时”(Wilson, 1970)。确实,原始的 SAP 已过时,但是一直为工程师保持着最新的版本。在 1970 年代初,用于结构分析的其他计算机程序包括: DYNASTARDYNE, EASE, ELAS, FRANHOUSEM, DYNAL, STRUDL, NASTRAN, SAMIS 和 STRESS。

1972 年在美国加州大学伯克利分校使用的大震动台(6.1m×6.1m),是当时世界上规模最大、最先进的设备,拥有相对简单的记录。日本很快也建立了几台更出色的。剑桥大学率先使用小规模土体模型和离心机进行岩土工程研究并于 1970 年代末应用于地震工程问题。1970 年,发明了有些类似于造船用的钢板剪力墙。1972 年,偏心支撑框架被添加到了地震工程师的词典里,这是第一个出于抗震目的设计的结构体系。在一段时间后,渐渐发现了其他在建筑领域引入许多年但并未考虑抗震的基本体系——抗弯矩框架、剪力墙和支撑框架。在这个时代,地震工程师开始创造他们自己的设备和系统,而不是改造那些只考虑重力荷载所设

计出的设备和系统。

历史背景：地震

自上届世界地震工程会议之后发生超过 1 000 人死亡的地震有：中国（1969 年，1970 年和 1974 年）、土耳其（1970 年，1971 年）、秘鲁（1970 年）、新几内亚（1970 年）、伊朗（1972 年）、尼加拉瓜（1972 年）和巴基斯坦（1974 年）。最大的生命损失（67 000 人）来自秘鲁的地震，造成损失的原因完全是自然灾害，即自然环境，而非建筑物和其他建筑的坍塌。安第斯山山坡陡峭，非常高，发生了一些大面积的山体滑坡，使得一些城镇和当地的居民全被掩埋。从结构工程的角度来看，尼加拉瓜地震的研究提供了很好的经验教训，一些建筑设计采用了加利福

利亚州现行的抗震设计规范，从而提供了对这些规范的测试。

在强震动记录方面，单单 1971 年的加利福尼亚州圣费尔南多地震就获得了大量数据：有 241 条记录之多。这一次地震的记录数是当时世界总量的 10 倍。获得埃尔森特罗记录时，仪器的质量已经得到了改善，远远超过数十年前。1971 年地震由帕克伊马大坝的仪器获得的一条加速度记录峰值加速度为 $1.25g$ 。工程师被迫重新校准其在地震动烈度和结构本身抗震能力方面已有的概念：大多数情况下均比几十年来的假设要大。将荷载和承载力合理化，使地震设计规范可以将结果更直观地呈现给工程师，同时提高结果的准确度，仍然任重道远。

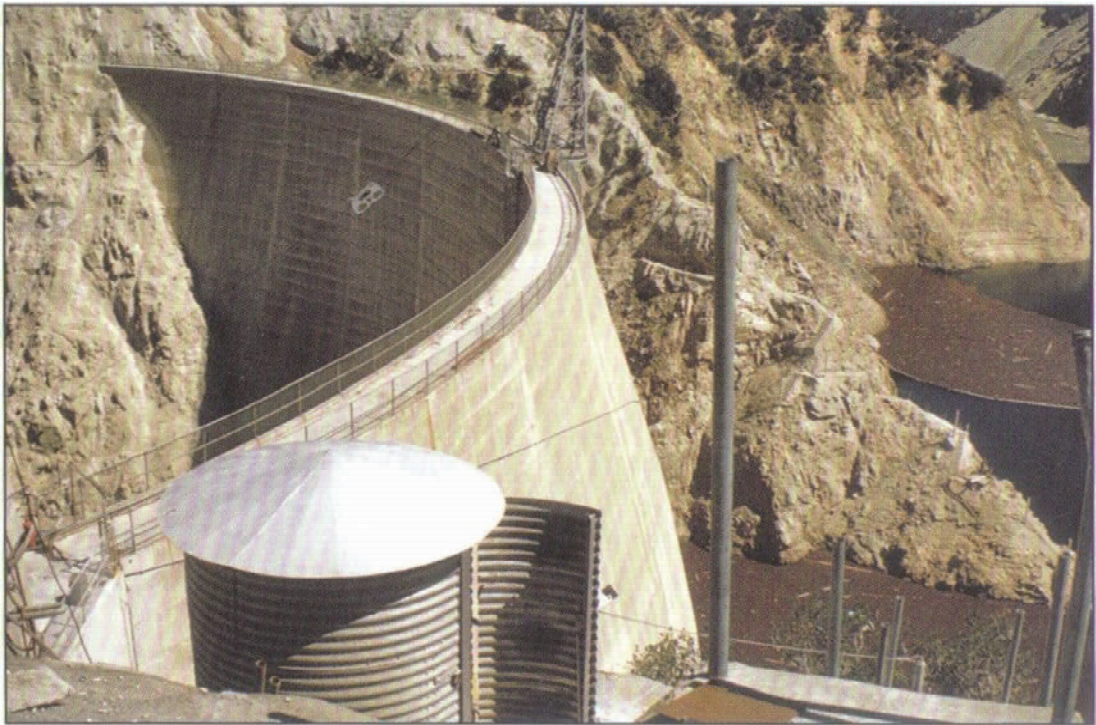


图 14 帕克伊马大坝，其前面的圆柱形金属棚内安置的加速度仪在 1971 年圣费尔南多地震中观测到加速度超过 $1g$ 。

—加州大学伯克利分校国家地震工程信息服务与太平洋地震工程研究中心

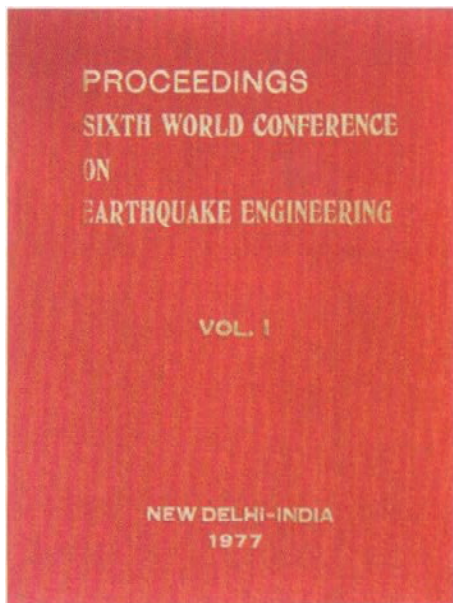
第六届世界地震工程会议：新德里(1977)

人们已证实,除了场地地质条件的影响外,方位角对形成地震动也有作用。Arnold 和 Vanmarcke 在 1971 年圣费尔南多地震记录中发现了这一现象。ATC3 项目的科研带头人在第六届世界地震工程会议中发表的关于 ATC3 项目不同方向的两篇论文,阐释了一种量化美国地震动危险性的创新性方式,并得出了一个创新的抗震设计方法。从那时起,这两篇论文中给出的摘要就成为世界上众多抗震规范发展的基础,尤其是对于所谓的地震影响系数或 R 因子的论述。Der Kiureghian 和 Ang 对一致危险性分析反应谱进行了研究,而 Shibata 和 Sozen 则引入了作为多层结构等效线性化过程的替代结构的概念。

本次会议与众不同,一名总理亲自参与到活动中。Donald Hudson(1997)回忆说,英迪拉·甘地总理“致了开幕词,我们在她家为会议官员举行了优雅的茶会,期间她还代表她的父亲对我创办的实验室表达谢意”。Hudson 所指的实验室在洛基大学,在该实验室发展的过程中另一位总理,英迪拉·甘地的父亲贾瓦哈拉尔·尼赫鲁,也亲自到那里访问以表达他对地震工程项目的支持。

历史背景：1977 年的科技

在 20 世纪末期,工程师们还不能以可识别形式日常使用计算机。最新的小型计算机外部存储设备是 5.25 英寸直径的“软盘”磁盘,容量为 100 个字节。千字节 KB 只是一个能级,注定不久不再神秘,被兆字节 MB 所取代,不久又成为 GB 和 TB。1974 年的世界地震工程会议时手持电子计算器刚刚被引入,到 1977 年,许多工程专业的学



生能买得起一个。仅仅一份 1970 年代计算机技术发展的年表就可使人们相信工程师们可以在那段时间日常使用计算机,但一个结构工程公司在 1975 年调查(Gates, 1975)发现,唯一广泛使用的电脑或类似电脑的装置是奥利维蒂计算机 P101,仅限于算术操作和平方根,拥有 240 字节的内存,折合成 2012 年的美元要花费 43 000 美元。

历史背景：地震

自上一届世界地震工程会议之后,发生死亡人数为 1 000 甚至更多的地震有:中国(1974 年和 1976 年),巴基斯坦(1974 年),土耳其(1975 年和 1976 年),危地马拉(1976 年),印度尼西亚(1976 年)和罗马尼亚(1977 年)。在这 10 年中,吸取了许多塑性设计方面的经验教训,至少体现在了最初的规范中。1976 年的中国唐山地震,是造成该世纪生命损失最大的地震。这正好处在中国一个新的经济时代的开始时期,从而导致该国建筑业和地震相关工程的研究实践得以快速发展。



图 15 布加勒斯特计算机中心，1977 年罗马尼亚地震。
—加州大学伯克利分校国家地震工程信息服务与太平洋地震工程研究中心

第七届世界地震工程会议：伊斯坦布尔(1980)

我们在理解和分析复制地震动时程中重新焕发勃勃生机地开始了新的十年。Joyner 和 Boore 提出的随机震源模型目前被认为是合成地面运动的经典论文。Kausel 和他的同事们的研究将弹性波在层状介质中的传播减小到了类似于结构分析的组分，而 New-

mark 和 Riddell 基于大量不同强震记录的详尽研究确定了非弹性设计谱的形式。现有的建筑在未来地震中会是什么反应呢？这是需要我们解决的疑难问题，回答起来非常具有挑战性。Umemura 在第七届大会报告的论文是最符合的早期方法之一。结构系统受到两个水平方向地震动同时加载的作用，因此，仅仅通过单向的荷载测试或单轴计算模

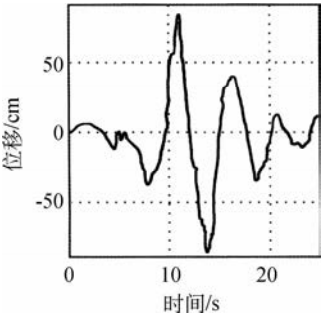
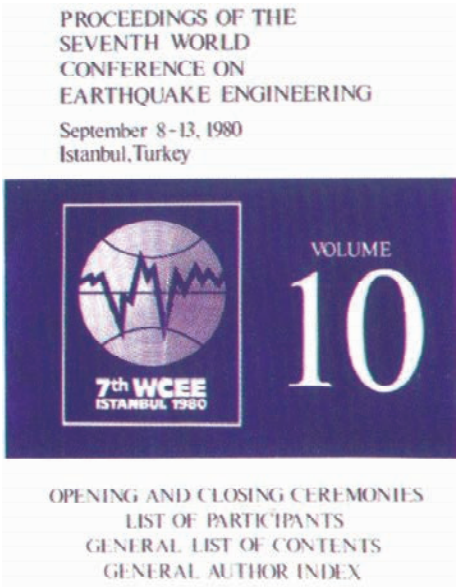


图 16 伊朗塔巴斯强震记录的位移时程

型能代表真实状态么？两篇文章，一篇是 Otani 和他的同事测试短柱在静位移下的情况，另一篇是由 Oliva 和 Clough 做的钢筋混凝土框架模型在振动台上的试验，得出了相同的结论：在双轴加载情况下，矩形柱表现出承载力下降，刚度的下降速度更为迅速。当截面刚度发生变化而引起非线性时这种现象更明显。如果存在强弱轴之分，就会主要发生强轴显著影响弱轴反应的双向耦合。

地震造成了文化财产以及普通建筑的损毁，许多这种损毁可以通过前期检查和加固来预防。Feilden 写道，历史建筑应该在可能发生的地震来临之前应用摄影测量技术鉴定并记录存档。地震之后必须要做的是，建筑管理者应该采取措施避免不必要的文化遗产损失。

历史背景：1980 年的科技

第一款台式机终于面世了，1981 年推出的 IBM PC 机在普及这项技术的历史上绝对是一件大事。1980 年，5MB 的硬盘驱动器令人惊叹地用到了台式电脑。一些重要的

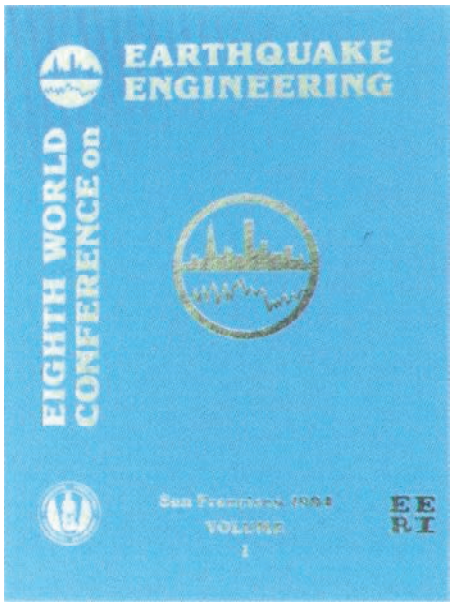
地震工程分析方法早在 1930~1950 年已经在概念上有所发展，例如，反应谱法出现在加州理工大学 Maurice Biot(1932)和 George Housner(1941)的博士论文中，而 Clough 等人研究了有限元方法。只有在 1980 年代由于计算机的进步，这些方法才变成许多土木工程中的实用工具。

历史背景：地震

从上届世界地震工程会议之后只有一次地震造成了至少 1 000 人死亡：伊朗(1978 年)。发生在塔巴斯的这次地震提供了近断层的强震动记录，在以后需要对结构要求较高的记录时这个记录被经常用到。这次地震的生命损失(20 000 人)再次证明，一些国家的领土不幸的是处于高地震活动性区，他们有重复遭受地震灾害的危险。

第八届世界地震工程会议：旧金山(1984)

时隔 28 年，世界地震工程会议又非常受与会者期待地回到了旧金山湾地区。7 本厚重的论文集显示了当时地震工程所包含的难以置信的课题范围。由于承认对地球科学参数需要根据地震危险评估，Schwartz 等人为了能可靠地估计最大震级而收集了地球科学所固有的经验信息。为了进行地震动和结构这两方面的研究，在台湾北部罗东建立了一个强震台阵。根据该强震台阵的记录，



可获得对判断近场地震动相关性很有用的强震测量结果，其中包括特性。罗东实验场是作为台湾与美国的一个联合研究计划建立

的，Bolt 为主要的技术负责人之一。这种强震期间的地震动系统测量结果对我们理解错综复杂的地震地面运动传播十分重要。1978 年 5 月在夏威夷召开的国际强震观测台阵仪器研讨会，将建立几何排列的强震台阵作为主要的建议之一。这次研讨会的建议和结论包括如下：

受地震威胁的国家(应该)单独或合作立即着手在本次研讨会确定的地点建立至少含有 10~20 个强震仪的台阵。

罗东台阵产生的数据被许多研究者用了许多年，对错综复杂的地震波及其与建筑环境的相互作用提供了新鲜的见解。我们现在通常用沉积土层最上部 30m 的剪切波速作为划分场地的指标。Joyner 和他的同事在第八届世界地震工程会议上发表的文章，解



图 17 四层建筑完全坍塌，阿尔及利亚 1980 年阿斯南地震。
—加州大学伯克利分校国家地震工程信息服务与太平洋地震工程研究中心

释了该方法的合理性。面波频谱分析(SASW)技术是在旧金山讨论的新发展之一。会议的焦点还有地下管道的表现和类似的其他基础设施系统。在城市脆弱性研究大标题下,也包括用于防灾减灾和应急响应的伤亡与财产损失的鉴定方法。城市中地震引起的火灾和灾后重建计划,作为人们地震后自发组织的社会群体活动也是其中内容。

历史背景:1984 年的科技

几个国家的地震工程实验室已经有高质量的振动台用于结构和岩土的试验研究,以及巨大的反力墙用于模拟地震荷载下结构的位移。数字强震加速度仪开始投入使用,1980 年在台湾开始修建的 SMART-I 台阵首次投入使用。

至于计算机,1980 年代的工程师比 1970 年代的工程师从计算机中获益多了许多。个人计算机时代已经到来,地震工程师现在可以用很快的速度和存储能力进行以前用计算尺完成的工作:做试验设计或分析假设,快速得到结果并思考结果,然后以反复的创新过程改进工作。工程师们不用将复杂的计算移交到集中服务公司或者带着打孔纸带去中央大学的计算机中心和等结果了,这都是计算能力的提高和新型电脑带来的显著进步。

历史背景:地震

在第七届世界地震工程会议之后的这段时间,造成至少 1 000 人丧命的地震发生在阿尔及利亚(1980 年),意大利(1980 年),伊朗(1981 年),也门(1982 年)和土耳其(1983 年)。在大多数情况下,受影响的建筑物主要是钢筋混凝土或砌体建筑,或它们的混合建筑,证明这些结构形式如果没有充分的抗震设计将是致命的。

第九届世界地震工程会议:东京和京都(1988)

随机波动模型模拟地震动的发展,以及经验格林函数(小震合成大震)的使用,成为合成地震动研究的结果。要获得全面和基于计算机的城市地震损失估计工具仍然有 10 年的路要走,对建筑物性能的评估还需要开发可靠的工具。这次会议期间首次出现了为此目的 Fajfar 所研制的 N2 法。这些研究针对的是情景研究中评估城市建筑群可能性能的结构单元。这种发展的一个必然结果是对现有结构单元的维修和加固技术更加关注。结构反应的滞变性质可通过测量响应检测出来,因此,可以发展更精确的计算模型。实验中复杂性的增加(在实验室通过土壤离心机模拟野外场地情况,混合实验技术需要实时在线控制)和更为重视海啸危险区的城市地震风险建模都是本次会议的主要议题。1988 年地震工程大会由于见证了基础隔震装置在结构反应控制的广泛应用而变得特别引人注目。本次会议的另一个独特之处是科技带头人准备了综合报告或者是最新的报告

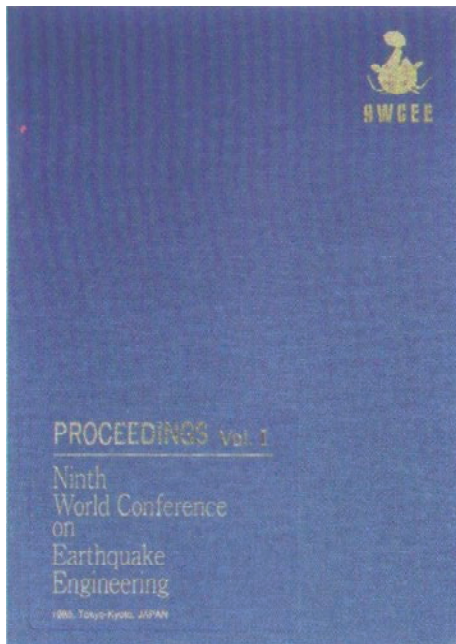




图 18 1985 年墨西哥城地震致皮诺苏亚雷斯
办公区一栋 21 层建筑垮塌。
—Robert Reitherman

来对所有的讨论给出展望。社会经济方面和人的行为被作为大会的主要议题，扩大和重新界定了地震工程的界限。

历史背景：1988 年的科技

因特网已经发展到工程师可以使用的地步，至少可以用邮件交流，尤其是在高校环境中。万维网仍然需要几年才能到来。对计算要求最高的研究，例如通过许多模拟地震用响应过程方法运算某一结构，现在已经是更多教授和他们的学生，以及一些专业人员可以实现了。

历史背景：地震

在第八届地震工程大会以来的 4 年中，造成至少 1 000 人死亡的地震有 4 次：墨西哥(1985 年)，萨尔瓦多(1986 年)，厄瓜多尔(1987 年)和尼泊尔-印度(1988 年)。袭击

墨西哥城的这次地震最具破坏性，表现出了可怕的动力响应现象：地面运动振幅相对较小，但其半谐波的特性变成了中高层建筑的自振频率并导致这些中高层建筑共振而倒塌。

第十届世界地震工程会议：马德里(1992)

1992 年的第十届世界地震工程会议给出的高水平论文的论文集有 11 卷。这是最后一次会议结束之后代表们需要带着沉重的资料离开。即使当时限制论文长度不长于 6 页，但仍然有那么多卷，显然世界地震工程会议在未来需要别的形式存储会议论文。

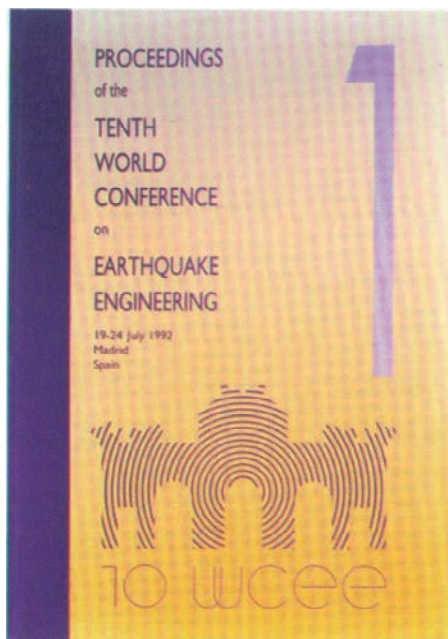
特邀论文和特殊的主题报告有效地结合起来，以此来权威地概述范围广泛的主题，形成了集中研究的这些领域：

- B. A. Bolt：地震工程中强地面运动

的综合研究方法

- W. D. Liam Finn: 地基土壤对地震造成破坏的潜在影响
- J. M. Kelly: 美国实施的基础隔震
- A. Der Kiureghian: 地震安全性评价的结构可靠性分析法
- M. Watabe, K. Dan, T. Saco 和 T. Okumura: 小区划和防灾减灾
- O. C. Zienkiewicz 和 M. Pastor: 计算力学和地震工程
- F. Darve: 动荷载下的土行为的本构关系
- T. Katayama: 生命线工程的最近发展
- A. Giuffre: 历史建筑和城市结构的抗震安全性和加固
- P. E. Pinto: 抗震设计: 基本研究进展和规范编制

马德里会议为结构控制的新兴领域提供了许多支持。美国国家科学基金会已经开始通过台阵智能传感器和控制机制,研究和开发在风荷载和地震荷载作用下的结构控制技术和相关设备,而且与日本展开了合作。随



后已有多年历史的《地震工程与结构振动》期刊也成了国际结构控制协会的官方出版物。其他的论文还涉及到通过面波频谱分析(SASW)测量识别以前的液化场地,了解超高强度混凝土结构组件的行为,用基于位移的抗震设计法来替代基于力的抗震设计,预测建筑物倒塌造成的伤亡,以及地震保险的投资组合分散。



图 19 1988 年亚美尼亚地震中在列宁纳坎倒塌的 3 层预制混凝土结构,右侧为倒塌的 9 层结构。

—C. J. Langer, 美国地质调查局

历史背景：1992 年的科技

1990 年，随着超文本标记语言(HTML 语言)的发展，计算机科学家已经意识到万维网极具前景。但是，该网络技术要真正实现使工程师和普通大众工作生活受益，未来还会需要几年。1991 年便携文件格式(pdf)技术开始问世，然而该技术的应用普及至少要等到 1990 年代中期。

历史背景：地震

自第九届世界地震工程会议之后造成至少 1 000 人死亡的地震为亚美尼亚(1988)、伊朗(1990)、菲律宾(1990)和印度地震(1991)。亚美尼亚地震表明，一次地震就可引起全国性的影响，给国家造成巨大的人员伤亡和财产损失。地震损失的比例量度与绝对量度一样重要，一些国家面临着“所有鸡蛋放在一个篮子里”的抗震窘境。

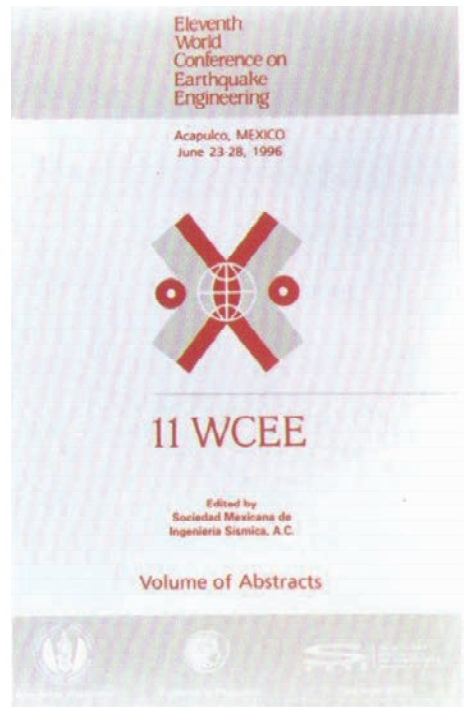
第十一届世界地震工程会议：阿卡普尔科(1996)

这次会议是在两次对地震工程进程留下很大印象的现代城市的大地震(1994 年洛杉矶附近的北岭地震和 1995 年大阪附近的神户地震)之后召开的。这次会议也是首次向参会代表发放装有几盘 CD 的小盒子，CD 中含有以电子存储格式存储的会议论文。然而，技术刚一解决了一个问题(替代了沉重的论文集)却又产生了另一个问题(由于硬件和数据检索软件的更新换代，计算机如何去搜索和读取存储在 CD 当中的论文)。

在大会上听代表做学术论文报告已成为大会的独有特色，而且做报告的都是权威知名的作者，紧紧扣住了时代趋势：

- C. Arnold：建筑的抗震设计
- J. L. Beck：系统识别方法在地震反应观测中的应用

- V. V. Bertero：目前发展水平报告：设计标准
- A. K. Chopra, J. C. de la Llera：偶发与自发扭转在地震反应和建筑设计中的应用
- E. Faccioli：论工程地震工具在震动情景中的应用
- W. T. Holmes：现有建筑的地震评估
- G. W. Housner, S. F. Masri：北岭和神户地震引出的结构控制研究问题
- R. Riddell, J. C. de la Llera：地震分析与设计：当前实践和未来趋势
- S. K. Singh：地震学的进步对地震危险性评估的影响
- M. Tomazevic：砖石结构建筑抗震设计的进展：欧洲展望
- R. Villaverde：二级结构的抗震设计
- D. E. Geis：防震社区的发展
- T. P. Tassios：混凝土结构抗震设计的发展
- T. D. O'Rourke：重要城市地震对生



命线工程带来的启示。

通过相隔一年的北岭和神户地震获取的强震记录，Borcherdt 探讨了特定场地设计参数的意义。在这两次地震中获取的不同场地类型的强震记录，为抗震规范场地设计反应谱的改进提供了标定的机会。同时我们可以看到 GIS 技术在震害图绘制中的应用和地震保险研究所取得的成果已经无容置疑。非线性动力分析复杂模型、利用圈梁来有效提高砌体建筑结构的性能和隔震研究成为本届会议的讨论热点。地震的经济损失评估是众所周知的难题，在神户地震中，利用震后一个星期之内的震害资料，Chang 以图片的形式重点给出了生命线系统的破坏和经济损失状况。

历史背景：1996 年的科技

1994 年 Netscape 公司开发的万维网浏览器一问世，就被看作是实用、面向大众的网络时代开始的重要标志。地震工程师通过

网页浏览文献，其中论文和报告通常以 pdf 电子文档出版。从此亲自去图书馆查找期刊论文的方式不再是唯一途径。人们可以远程登陆图书馆，快速搜索查找到相关文献，一分钟之内就可以阅读到文献，这在几年前还只是梦想。

历史背景：地震

自第十届世界大会之后，至少 1 000 人死亡的地震发生在印度尼西亚(1992)、印度(1993)、日本(1995)和俄罗斯(1995)。印度的地震死亡人数最多，也是发生在大量人口生活在相对没有抗震建筑内的地区。日本阪神特大地震中，地震的破坏能量集中在大城市神户，地震损失巨大，说明即使在一个长期保持地震工程科研领域领先地位的国家，损失也会很惨重。严重的破坏甚至发生在 1970 年代末和 1980 年代初新建的建筑上，这些建筑是按照现代抗震规范设计的，被认为是可以抵抗该级地震的。神户港是世界上最大港口之一，神户港口的破坏表明，



图 20 1999 年特大阪神或称神户地震由于地基失效引起的神户渡轮码头倒塌。
—加州大学伯克利分校国家地震工程信息服务与太平洋地震工程研究中心

需要将工程地震、岩土、基础设施建设方面专家的知识都应用到该类建筑中。美国加州的北岭地震，尽管人员死亡较少，但是也暴露出一些新建的、按抗震规范施工的建筑有易损性，比如焊接的抗弯矩钢结构。

第十二届世界地震工程会议：奥克兰(2000)

在此次会议召开之前，近 10 年的研究报告中对基于性能的抗震设计进行了激烈的重新讨论，近些年又出现向基于位移抗震设计规定的转变。1900 年，从意大利和日本初次提出等效静力荷载模型以来，经过几十年的发展，静力法已经成为一种标准。位移法也逐渐变成建筑风险评估、决定是否需要改造和加固的切实可行的通用方法。由于各种原因，许多国家充斥着达不到规范的建筑，为此政府在压力下为了降低风险而出台了大量的城市重建规划。地震工程的许多领域都与风险评估和改造加固直接联系了起来：包括基于性能的工程、地震危险性、非建筑系统的性能、改造翻新的费用，以及公共政策。危险性评估和加固改造所涉及范围较广，并与我们的日常生活有着

密切的相互联系。对地震损失进行迅速、系统化评估的工具已经开发了出来。随着 GPS 技术开始变的越来越精确，对建筑结构振动实时监测被认为是鉴定建筑物继续使用安全性很好的方法。研究的重点再次转移到了近场地震动效应，其中长周期的速度和位移波动特性均对之前“艾尔森德罗形”场地记录所描绘的结果提出了质疑。密集布设强震仪被认为是一种快速评估地震损失的方法，并运行了日本横滨的强震观测系统。对于震灾之后的撤离，城市空间的设计是关键，因此讨论了城市规划的课题。

历史背景：2000 年的科技

尽管 1930 年代末测量应变(电阻应变仪)和测量位移(线性可变差动转换器 LVDT)的两种基本仪器仍在使用，但现在地震工程实验室使用的仪器已经变得更先进。地震工程学家 Arthur Ruge 发明了电阻应变仪进行水塔的振动台实验，该仪器有效替代了力学测量，而线性差动转换器 LVDT 是由航空工业发明。尽管这两种仪器都是依靠电力来运转，但未到 20 世纪最后几十年电子革命已成熟到在实验室能直接实现传感器与计算机之间数据传递，从而使数据信息的存档和操作更加简单方便。早期基于模拟的实验室设备，如振动台，开始实现数字系统的控制，在得到数字化地震动记录的情况下，使振动台按照指令振动，并且数据在设备之间可以无缝对接。

历史背景：地震

在第十一届会议之后的 4 年中，发生了多次造成 1 000 多人死亡的地震：伊朗(1997 年 2 次)、阿富汗(1998 年 2 次)、哥伦比亚(1999 年)、土耳其(1999 年)和中国台湾(1999 年)。最后两次地震发生在有现代建筑的城市区，其破坏极具启发性。尽管这两次地震都是大灾害，然而它们却说明了

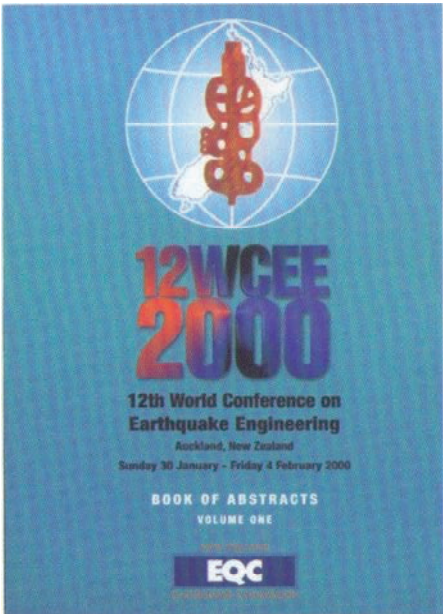


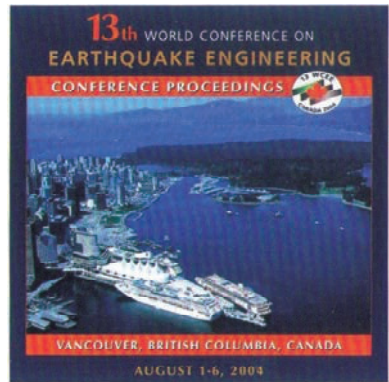


图 21 铁轨上的变压器顺时针侧翻，1999 伊兹米特或称科贾埃利地震。
—加州大学伯克利分校国家地震工程信息服务与太平洋地震工程研究中心

如果类似地震发生在像伊斯坦布尔和台北这样的中心城市其损失程度会有多大。

第十三届世界地震工程会议：温哥华(2004)

1990 年代，非线性静力分析程序(包括能力谱)发展迅速，它是一种评估框架结构在某地震动危险性水平下性能的实用方法。然而，由于一部分是图形而其他源自数量有限的变量或记录，且在不利条件下它可能不收敛于正确的目标位移，因此该程序的精确度不高也被大家所公认。以 FEMA 440 报告终结的 ATC 55 项目旨在解决这些问题，Comartin 和他的同事报告了初步的改进方案。在美国，由美国国家科学基金会支持的地震工程模拟网(NEES)给十几个高校实验室提供了大量的试验设备，且能远端控制。断层破裂危险性图进入了本次会议的论文集。强震学发展的最终阶段将是我们可以精确模拟未来地震的破裂过程，包括地震动的传播路径和场地放大作用，进而确定地震动与震害之间的关系，得出一个包含全部信息的图形，用于减轻震害。由此得出，强震预测是减轻未来地震震害的一个关键因素。Irikura 研究了这一诱人的前景。对于大多



数工程应用，知道未知地震准确的时程是不必要的，但应对地震幅值、持续时间及频率有大概的认知。Strasser 和她的同事研究的一个相关问题是确定地震动上限的必要性，确定地震动上限后，对重现周期较长的强烈地震动的离散统计估算可以设限。

历史背景：2004 年的科技

尽管振动台不是地震工程唯一有用的实验设备，但它仍然对实验研究来说是核心设备。20 世纪末，筛选出最重要的 39 个振动台设备，我们发现，其中 3/4 的振动台有 2 个方向的自由度甚至 6 个方向的自由度，然而在 20 年前或更早些，却基本上是沿单一



图 22 2003 年阿尔及利亚布米尔达斯和阿尔及尔地震。
—Djillali BenourDjillali Benour，埃苏亚大学

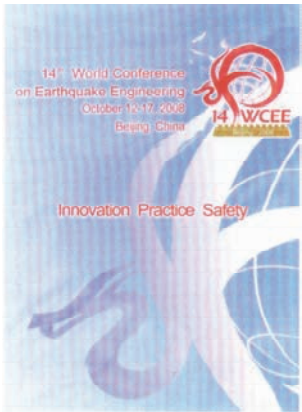
方向的(Fabbrocino *et al*，2003)。

历史背景：地震

自 12 届世界地震工程会议之后造成 1 000 或更多人死亡的地震发生在印度(2001)、阿富汗(2002)、阿尔及利亚(2003)和伊朗(2003)，是以前世界大会之间时间段多次列出的国家。尽管 20 世纪末的地震工程知识足以防止大多数情况下的建筑倒塌，但如何将专业知识运用于大量建筑群以及那些建筑规范的落实力度较小的地区，依然任重道远。

第十四届世界地震工程会议：北京(2008)

这是截止到该届世界地震工程会议出席人数最多的一次会议，有大约 3 500 人参加，发表 3 041 篇论文。论文和张贴覆盖的题目范围表明地震工程研究的复杂性和先进性在不断增加。例如，桥梁工程师如何考虑桥梁横穿断层线时发生断裂的影响。Goel 和 Chopra 研究了静力作用下的位移和震动



引起的动力位移的影响。关于对重现期较长的强震预测是否是可实现的，或它们是否可以从对数正态分布上端的残差推出，地球物理学家和工程师之间展开了持久的辩论。这对关键结构的危险性研究具有深远的影响。

有一批论文的主题在后来 2011 年 3 月 11 日袭击日本东北近海的 M9.0 地震中得到了残忍的验证。Iwabuchi 等人撰写的一篇文章考虑了日本海啸爬高的数据库和核电站的海啸灾害。Motosaka 和同事们研究了



图 23 2004 年苏门答腊，印度尼西亚地震和海啸。

—Herman Fritz, 乔治亚理工学院

万一发生近海俯冲带地震时仙台警报时间的有效性。

北京会议也有关于地震危险性评估及其管理方面的论文报告：超过 100 篇论文是关于此主题的。自地震工程领域逐步开展至 14 届世界地震工程会议经历了足够长的时间，这是第一次有撰写该领域历史的专题报告。

历史背景：2008 年的科技

2005 年，在靠近神户的三木市的 E-Defense 振动台开放了。这一世界最大且功能最强的地震模拟器，迄今还没有计划建立类似规模、能力和耗资的设备可以超越它。尽管自 1956 年第一届世界地震工程会议举办以来该领域的分析能力得到了很大的提高，但地震工程师仍然依赖实验研究或实际抗震性能来验证他们的计算机模拟和计算结果。

历史背景：地震

大多数破坏性地震（死亡人数 1 000 及以上）发生在印度尼西亚（2004，2005 和

2006）、巴基斯坦（2006）和中国（2008）。后两次地震的死亡人数最多，均超过 80 000 人。2004 年印度尼西亚地震的损失主要是由海底位移引起大海啸造成的，它给印度洋的几个国家造成了破坏和生命损失。1946 年就开始针对太平洋运行的海啸预警系统在印度洋却没有相应的设备，表明地震工程应用有更全球化的需求。

第十五届世界地震工程会议：里斯本（2012）

这届会议收录的论文超过 3 400 篇，表明地震工程领域仍在发展。来到里斯本，这届会议庆祝了世界地震工程会议举办 50 周年并与历史链接追溯到更早的先前，因为 1755 年的地震是最早吸引科学家关注这一自然灾害的地震之一。

历史背景：2012 年的科技

虽然之前几届世界地震工程会议已经实现电子化注册、提交论文摘要和论文，以及会议论文集的出版，但第 15 届世界地震工程会议设立了使用信息技术为国际会议提供



便利的新标志。信息技术在论文中同样有体现，例如为了事前减灾或灾后应急反应阶段的损失评估，通过人造卫星采集数据来收集建筑清单。到了 2012 年，对地震各种主题的网络快速搜索已成为一种更加广泛的、无缝的和简便的方法。到了 2012 年，国际地震工程协会更多地使用万维网和别的通信方法来促进信息共享。

历史背景：地震

自第 14 届世界地震工程会议以来，造成 1 000 以上人数死亡的地震发生在印度尼西亚(2009)、海地(2010)、中国(2010)和日本(2011)。日本的灾害主要是海啸灾害，它是本州岛东北部海岸核电站泄露的元凶。该

核电站设计中使用的目前预测地震影响的技术已证实是易失效的。日本的地震工程并没有忽视海啸的影响，对海啸灾害已有一定研究，但是估计值明显过低以至于核电站的防波堤失效。另一个地震工程较先进的国家新西兰，也发生了类似的警示事件，起因是 2010 年和 2011 年，克莱斯特彻奇市附近发生一次地震和一些余震，规模超出了建筑规范预估的范围。地震工程中使用了不断改进的概率技术来智能管理未来地震影响的不确定性，但是日本和新西兰的这几次地震提示不确定性因素仍然大量存在。2010 年在智利发生了一次特大地震(M8.8)，尽管它在很大区域导致了中等至强烈震动，但是损失相对来说较小，这表明该国所走的地震工程措施实施之路是正确的。将建筑需求(材料的隔音性、耐火性和耐久性)与结构有充足抗震性能的目标相结合的策略已证明是有效的，后者以大量钢筋混凝土墙实现。还有正如在过去的地震中一样，结构布置不规则如柔层的使用，有时会使好的抗震设计努力付诸东流。



图 24 太子港，2010 年海地地震，倒塌的居民区。
—Marko Kakic，国际红十字会与红新月会联合会

6 结论

自 1956 年更正式打算纪念 1906 年旧金山地震 50 周年而在伯克利举办第一届世界地震工程会议以来,地震工程领域得到了极大发展。其后的 1960 年东京会议促使成立了国际地震工程协会,即由立志于更好地保护世界免受地震威胁的一个个专业人员组成的各国协会的全球大家庭。这意味着一场人与自然之间持续的竞争,要长期不懈地理解地球的地壳中突然爆发释放累积的能量所产生的影响。虽然科技进步使我们能够构建建筑环境,这样在可能发生地震的地方我们对建筑的良好抗震性能有信心,但对达到万事如意仍有重重障碍。经济或社会的约束、人们的冷漠或误解、自然界意外事件的发生,或城市不断扩张所带来的更多迫切需求,都使得想要对全社会覆盖地震安全伞是不现实的。从许多方面来说,今天我们有更多便利、技术及完善的计划进行这个领域的研究,并且在初期可以为少数人提供该领域可令人喜欢的教育和研究的机会。这使我们不得不对各位高瞻远瞩的前辈充满了敬意,因为他们指引了我们在這條道路上前进,感谢他们在该领域之初做出的贡献,虽然这些成就有时被后人想的过于简单。

这里对破坏性地震的简要回顾显而易见,很多国家的地震损失还远远没有控制到合理的水平。国际地震工程协会继续力争实现两个互补的目标:增加地震工程的知识与能力和在世界各地更有效地实施这些专业措施。国际地震工程协会不能单独完成这项任

务,因为为了构建更安全的人文环境所进行的研究、发展,以及聪明的思路如果没有被各级政府贯彻实施将不过是一纸空文。国际组织如联合国和国际金融机构可以引导计划,督促各国政府规划并资助防灾减灾的项目,但上面下达的项目难免处于资金短缺、技术缺乏、社会焦点分散、人类冲突和其他不理想现状的危机中。

我们很难预言未来 50 年国际地震工程协会所扮演的角色。它有高大的国际形象,与成员国及其他国际组织之间有旨在实现更好抗震安全目标的更紧密的合作,这会指导其行动。归根结底,国际地震工程协会是一个有共同目标且各司其职的专业人员的协会。他们知道,随着人口增长和地震危险区域内建筑的快速发展,更多的社会财产将处于危险之中。在很多方面,我们今天比地震工程领域的开辟者们得到了更多便利、技术、教育和研究项目。这使得我们对那些具有远见卓识的先驱充满了敬意。这同样是我们对接班人的责任所在。

本文翻译出版得到地震行业专项基金
(201108003)支持

译自: The IAEE at fifty 资料, 2012. 1~71

原题: A brief history of International Association for Earthquake Engineering

(中国地震局工程力学研究所 任叶飞、冀昆、黄旭涛、温瑞智译;吕春来校)