

编 号: (81)016

出国参观考察报告

从第七届世界地震工程会议
看地震工程学的最新进展

56.259
410-1

科学技术文献出版社

出国参观考察报告

从第七届世界地震工程会议看地震工
程学的最新进展

编 辑 者：中国科学技术情报研究所

出 版 者：科学技术文献出版社

印 刷 者：中国科学技术情报研究所印刷厂

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：5.5 字数：133千字

1982年6月北京第一版第一次印刷

印数：1—2,614册

科技新书目：27—57

统一书号：12176·43 定价：0.82元

目 录

前言	(1)
一、强震观测与地震动	(3)
(一) 强震仪器台阵与数据处理	(3)
(二) 关于地震动特征的研究	(4)
(三) 模拟地震动	(11)
二、地震活动性、区划和小区划	(13)
(一) 地震活动性	(13)
(二) 地震区划	(13)
(三) 地震小区划	(14)
(四) 场地影响	(15)
三、岩土工程	(16)
(一) 砂土液化	(16)
(二) 土动力特性	(20)
(三) 土工结构	(20)
四、结构抗震设计	(21)
(一) 近年来的地震灾害经验总结	(22)
(二) 几类结构抗震性能的研究与改进	(23)
(三) 抗震设计计算方法	(29)
五、抗震结构计算方法	(32)
(一) 框架—楼盖—剪力墙体系	(32)
(二) 一维、多维非线性分析	(33)
(三) 复杂地面运动激起的反应	(34)
(四) 结构—液体相互作用	(35)
(五) 结构—地基土相互作用	(36)
(六) 结构模型识别和地面运动反演	(39)
(七) 几类特殊问题的研究	(40)
六、钢筋混凝土结构构件抗震性能	(41)
(一) 钢筋及混凝土材料性能	(41)
(二) 钢筋混凝土的节点	(43)
(三) 钢筋混凝土短柱	(46)
(四) 钢筋混凝土框架	(49)
(五) 剪力墙	(50)
七、砖石结构抗震性能	(54)
(一) 砌体基本性能的研究	(54)
(二) 破坏机制、设计和鉴定方法的研究	(56)
(三) 修复和加固	(59)

八、水坝抗震.....	(60)
(一) 土石坝部分.....	(60)
(二) 混凝土坝部分.....	(67)
九、生命线系统的抗震问题.....	(69)
(一) 生命线系统的含义、特点和研究现状.....	(69)
(二) 地下管线的抗震分析.....	(70)
(三) 生命线系统的分析.....	(72)
(四) 生命线系统的震害与修复.....	(74)

从第七届世界地震工程会议看 地震工程学的最新进展

中国出席第七届世界地震工程会议代表团

前 言*

第七届世界地震工程会议于1980年9月8日至13日在土耳其伊斯坦布尔召开,我国由国家建委组织了一个八人代表团参加。这次会议是在国际地震工程协会主席克里希纳(Jai Krishna)的领导下,由土耳其全国地震工程委员会主持召开的。与会人员约800人,来自近五十个国家和地区。会议选举了哈德逊(Donald E. Hudson)为新的协会主席,彼特洛夫斯基(Jakim Petrovski)为新的秘书长,并决定第八届世界地震工程会议于1984年在美国旧金山召开。

这次会议的议题涉及地学、土木工程、规划和法规、社会经济、地震经验以及研究机构的工作进展等方面,内容颇为广泛。会议将收到的747篇论文,编成了长达九卷的会刊。从会议内容可以看到当前地震工程的发展梗概。

首先,地震工程的研究领域正在日益扩大,与有关学科交叉渗透。地震危险性分析是以地震活动性和地质构造的研究为基础的;地面运动的预测也联系着震源机制的模式。此外,从地震威胁派生的社会经济和社会心理问题以及城市规划和土地利用问题也都提到了研究日程。可以说,地震工程正不断从工程意义向以减轻地震灾害为目标的多学科研究领域延伸。因此,参加会议的有各行各业的专家,除了土木工程师以外,还有建筑师、机电工程师、地球物理学家、地质学家、保险事业家、社会经济学家、心理学家等。

工程结构的抗震问题是会议的中心课题,论文数量占会刊全部篇幅的一半以上。从这些论文看,着重研究的结构还是一般易受震害的房屋建筑,如多层钢筋混凝土结构、砖结构、装配式大板结构等。研究课题包括抗震性能、设计方法、修复加固、震例分析各个方面。对钢结构和高层建筑的研究则很少。对特殊结构,如原子能发电站、各种水坝,虽有所报道,但比重亦小。理论研究比较集中在多分量地面运动的影响,三维与非线性结构、各种相互作用系统识别等方面。值得注意的是,利用隔振、消能和自动控制等方法来减小结构反应的研究有所进展。对于占地面积广大的生命线系统的整体地震危险性的研究初见端倪。

在土工方面,主要课题为砂土液化,论文数量居半。其它课题有桩基的抗震性能和土坎与边坡的稳定性。

强震观测和地面运动特性的研究作为地震工程的基础工作仍受到重视。观测台网正走向国际化。可以期望,通过国际合作在全世界地震频繁地区布设密集台阵,能够提高强震记录

* 前言部分由刘恢先同志执笔。

的积累速度。地面运动的研究则着重于场地条件的影响，运动过程的统计特征和模拟方法。

本届会议与过去几届会议不同之处是对近年的地震经验报道很少。但这不能说明经验不重要，相反地，只能认为这是本届会议的不足。

总的来看，地震工程在世界范围是一个活跃的研究领域。世界地震工程会议的规模逐届扩大，调查与观测、理论与实验等各项研究正在大量进行，地学、数学、力学、社会经济学不断渗入。但是在解决实际问题方面的进展并不很大，迄今未见重大突破，既不能准确地预测地震危险性，也不能很好解释已经发生的地震破坏现象。可见地震工程是一门发展较慢的学科，其根本原因在于地震不常发生，经验的积累需要时间，一国的经验尤其不足。所以，加强国际交流，吸取全世界的经验，对我国的社会主义现代化建设具有特别意义。

中国出席第七届世界地震工程会议代表团名单

团 长	刘恢先	中国科学院工程力学研究所
副团长	叶耀先	国家建委抗震办公室
团 员	朱伯龙	同济大学结构理论研究所
	龚思礼	中国建筑科学研究院工程抗震研究所
	周锡元	中国建筑科学研究院工程抗震研究所
	陈厚群	水利水电科学研究院
	王前信	中国科学院工程力学研究所
	郭玉学	中国科学院工程力学研究所

一、强震观测与地震动

郭 玉 学

强地震动 (Strong Ground Motion) 是第七届世界地震工程会议上地学方面的一个重要组成部分。与该问题有关的论文主要集中在会议论文集第二卷, 包括以下四个方面:

1. 强震观测的仪器布设与资料收集;
2. 场地条件对地震动的影响;
3. 模拟和人工地震动;
4. 地震动的谱分析与解释。

从会议上发表的论文内容来看, 有关强地震动问题研究的重点是发展强震观测台阵 (包括国际协作台阵), 改进强震记录的数据处理与分析技术, 研究地震动, 特别是近场地震动的特征和建立比较合理的地震动模拟方法等。

(一) 强震仪器台阵与数据处理

地震震害主要是由强烈的地震动引起的, 其中包括地震动直接造成的和间接因地基失效导致的破坏。为减轻震害损失, 使工程结构的抗震设计建立在科学的客观基础上, 测量大震时地震动的有效规划急需有关国家与国际协作制定。第七届会议上, 美、日、意、墨和土耳其等国代表分别介绍了本国强震观测的现状、规划、台阵设计、记录获得情况和数据的处理方法。而且许多国家都有不少单位从事这项工作。近年来, 各国设置的强震仪台数增加较快。例如, 美国参加强震观测的单位有五大系统, 拥有强震仪的数量分别为: (1) 在美国地质调查局 (USGS) 指导下, 由各州支持的单位拥有458台; (2) USGS直接管理373台 (另有地震计250台); (3) 国家一级部门管理400台; (4) 州级部门管理92台; (5) 房产机关提供资金安设和维护225台。目前世界各国安装的强震仪已超过5000台, 取得的有用记录约2000个。但是, 在距震中40公里内取得的七级以上大地震的强震记录为数不多。为尽快取得大震记录并充分发挥现有记录作用, 国际上对下面三个问题比较重视。

1. 强震仪器台阵的场地选择

场地选择是目前各国发展强震台网时都十分注意的问题, 特别是用较多仪器布设专门设计的强震仪台阵时, 场地选择是否恰当是关系其效益如何的大问题。据日本S. Omote, K. Ohmatsuzawa和T. Ohta(2/41)*报导, 日本有关专家曾聚集在一起, 讨论了建立日本强震台阵系统的问题, 提出台阵场地选择应考虑的主要项目为:

- (1) 高烈度区并能获得许多中强记录;
- (2) 场地的地质地貌特征简单;
- (3) 近代形成的地表覆盖层较薄;
- (4) 在适当深度处存在相当硬的基岩并且有相当高的剪切波速;

* 各章节遇到[], []中的分子表示第七届世界地震工程会议论文集卷数, 分母表示论文开始页数。

(5) 存在一平坦地面, 足够布设几百米范围的子台阵。

S. Polinari(2/49)介绍了意大利的特殊建筑物, 如大坝、核电站等观测点的选择原则。美国F. E. Udawadia等人(2/55)研究了台网布设中应用优化技术的方法。

2. 强震台阵设计

许多研究家一致强调, 为了取得大地震的强震资料并为多方面的研究服务, 必须合理布设强震仪器台网, 密集的台阵应经专门设计。W. D. Iwan 在“关于国际强震仪器台网的报告”(9/15)中, 将建立密集台阵需要研究和考虑的几个问题归纳为:

- (1) 合适的台阵位置;
- (2) 震源机制和波传播研究的台阵设计;
- (3) 局部效应台阵设计;
- (4) 台阵建设与运转维护;
- (5) 计划的执行(包括保证经费和实现计划的组织机构)。

上述问题是国际地震工程协会于1978年5月召开的“国际台阵专题讨论会”重点讨论的课题。作为会议的结果建议在全世界可能发生大地震的地区建立28个台阵。会后, 在被选择的地点或附近地区发生了四次较大地震。虽然倡议的台阵尚未建立, 但却说明会议提出的选点原则及考虑的因素是可行的。

3. 数据处理中心与纪录信息分析

强震台网规模较大并取得一定数量强震记录数据的国家, 为了收集、处理和散发强震记录资料, 十分重视建立数据处理中心和改进记录信息分析技术。建立数据处理中心的关键是解决强震记录处理设备。有些国家逐步形成了几个中心。如美国在地质调查局的加州门罗公园地震工程研究部, 加州矿业地质部、南加州大学和斯坦福大学等处形成了四个数据处理中心。R. D. Rorcherdt和R. B. Matthiesen(2/9), M. D. Trifunac(2/545), H. C. Shah与J. M. Gere(9/129)等人的报告, 介绍了美国几个数据处理中心的设备和能力。这些中心都有比较先进的数字化设备和计算机, 通过编制的程序可快速处理这些记录, 将资料散发到感兴趣的研究者手中。南加州大学研制的新型数字化设备, 比目前各国试验室中通用的读数机的效率提高一个数量级, 分辨率高达12.5微米。门罗公园数据处理中心发展了一种强震资料检索系统, 可以很方便地获得西半球强震记录的现代情报。该系统还可以通过计算机终端和电话向用户提供有关资料特征, 记录环境和档案位置等。

不断改进数据处理方法, 从强震记录中提取尽可能多的、精度较高的信息是充分利用记录的基本要求。在这方面, A. Arias和H. Sandoval关于采样间距和内插方法(2/25), 随机数字化误差对富氏谱精度的影响的研究(2/33), Y. Nakamura关于利用转换地震仪动力特性的数字算法求精确的地面加速度、速度和位移的研究(2/17), V. M. Graizer关于建立包括永久位移在内的恢复位移的研究(2/391)等是值得参考的。

(二) 关于地震动特征的研究

强震仪记录的地震动通常是加速度图, 经过数据处理与分析可以导出地震动的速度、位移、富氏谱、反应谱、反应包线谱、时变谱、功率谱, 以及适当定义的持续时间、均方根加速度、有效加速度和谱烈度等等描述地震动特征的参数。本届会议对上述参数均有所论及, 而且是与地震动的衰减、场地条件的影响、近场地震动特征以及地震动的谱分析等问题的研

究密切结合的。

1. 地震动参数的衰减规律

地震动的衰减是指上述某些参数随震级和震中距等因素的变化规律问题, 这是地震工程界长期以来努力积累资料 and 研究的课题。有关的文章多集中于地震动峰值的研究。

Y. Ohsaki、M. Watabe 和 M. Tohto [2/97] 研究了包括垂直分量在内的加速度和速度峰值衰减公式。J. A. Blume [2/403] 着重分析了震中距在加速度衰减关系中的参与作用。R. Herrmann 和 O. W. Nuttli [2/533] 针对美国中部地区缺少强震记录的情况给出了估计地震动加速度最大值的公式。D. M. Boore [2/577] 根据 Wood-Anderson 地震仪记录的幅值和震级导出了峰值速度计算公式。

下面略述 R. T. Eguchi [2/113] 关于地震动加权平均值的研究。他认为, 地震期间感到的地震动强度是个多变量的函数, 这些变量包括: 地震大小、地震类型、震源深度、震中距、震源与场地之间的地质、仪器位置与方向、能量释放形式与聚焦效应以及地形等等。他对基本上利用美国加州强震资料由一些知名学者给出的 42 个衰减关系 (22 个峰值加速度, 12 个峰值速度, 8 个峰值位移) 作了考察, 发现虽然条件大体相似, 但给出的地震动预测值相差高达一个量级。为了模拟这种变化, 他建议取全部可用的地震动形式的加权平均, 尽量将上述因素考虑在内, 当用 ξ_i 表示文中定义的加权系数时, 地震动的加权平均值由下式计算

$$\log\{\bar{X}(m, R)\} = \frac{\xi_1^{-1} \log\{X_1(m, R)\} + \xi_2^{-1} \log\{X_2(m, R)\} + \dots + \xi_n^{-1} \log\{X_n(m, R)\}}{\frac{1}{\xi_1} + \frac{1}{\xi_2} + \dots + \frac{1}{\xi_n}}$$

式中 n 代表衰减方程的总数, $X_i(m, R)$ 代表第 i 个地震动衰减方程。对一系列不同的震级 m 和震中距 R 算出 $\bar{X}(m, R)$ 后, 可得到如图 1-1 所示的加权平均衰减曲线。该结果对预测峰值加速度、速度和位移的平均趋势有参考价值。

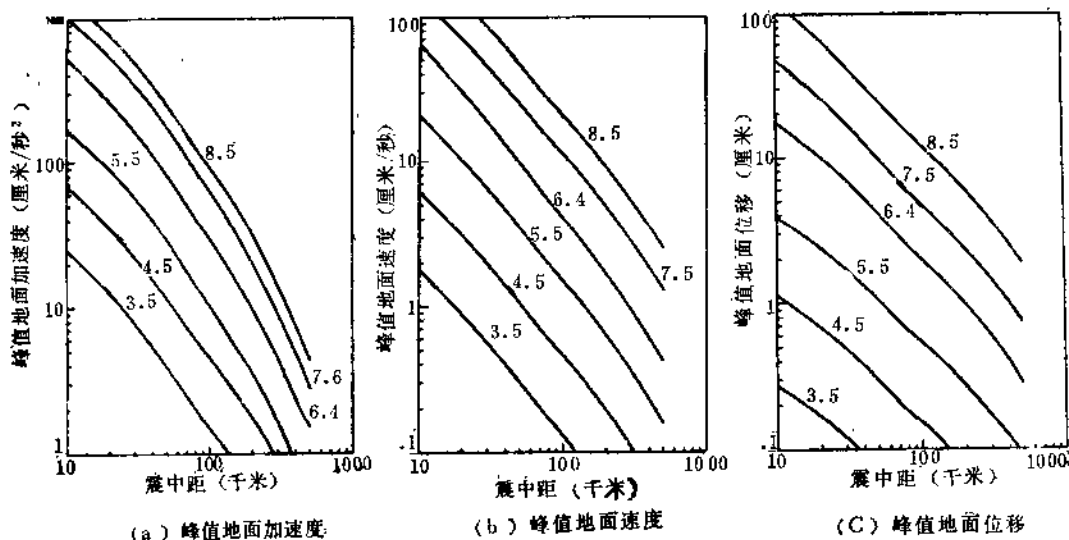


图1-1 加权平均衰减曲线

地震动参数衰减的重要应用是寻求其与宏观烈度的对应关系。刘恢先 [2/569] 认为, 烈度是一定地区地震动强度的总评价, 而且只能用该区域内的某种平均物理量来度量。他分析并利用国际上常用的地震动衰减资料 and 我国发展的震害指数, 在新建议的中国烈度表中, 按

烈度分级给出了对应的地震动加速度和速度（见表1-1），从而使我国烈度表向定量化前进了一步。

表1-1

烈 度	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
震害指数		0—0.10	0.11—0.30	0.31—0.50	0.51—0.70	0.71—0.90	0.90—1.0	1.0
加 速 度	31	63	125	250	500	1000		
厘米/秒 ²	(22—44)	(45—89)	(90—177)	(178—357)	(358—707)	(708—1414)		
速 度	3	6	13	25	50	100		
厘米/秒 ²	(2—4)	(5—9)	(10—18)	(19—35)	(36—71)	(72—141)		

V. W. Lee(2/121)研究了地震作用下单自由度系统的最大反应时间，并给出了二个模型。其中用震级M和震中距R表示的模型公式如下：

$TMAX(T)_p = a(T)_p + b(T)S + c(T)M + d(T)R + e(T)V$ 式中 $TMAX(T)_p$ 是周期为T，阻尼为P时的最大反应时间；S表示场地条件（硬基岩S=2，冲积层S=0），Y表示运动方向（水平V=0，垂直V=1）。重要结果有二：i) 当周期T小于4秒，震中距小于20—30公里时，硬基岩水平运动反应的最大值是在S波到达以后几秒钟之内出现；当震中距每增加50公里时，最大值出现时间约再晚1秒。ii) 垂直分量的最大反应时间比水平分量的最大反应时间落后1到5秒钟。

2. 场地条件对地震动的影响

许多研究者都一致认为，除震级和震中距外，场地条件对地震动的振幅、持续时间和谱值的变化均有较大贡献。

小局部场地土质的影响：地震动记录都是在具体场地上取得的，而且它对地震动参数的影响非常明显，以致大部分人都主张将岩石与土分开。例如Y. Ohsaki 等人(2/97)根据75次地震数据，给出了日本基岩场地的峰值加速度A和速度V的估计方程：

$$A^h = 10^{0.440M - 1.38\log R + 1.04} \text{ (厘米/秒}^2\text{)}$$

$$V^h = 10^{0.607M - 1.19\log R + 1.40} \text{ (厘米/秒)}$$

$$A^v = 10^{0.485M - 1.85\log R + 1.38} \text{ (厘米/秒}^2\text{)}$$

$$V^v = 10^{0.485M - 1.25\log R - 0.85} \text{ (厘米/秒)}$$

式中右上角的h与v分别表示水平与垂直分量，M与R分别为震级和震中距。

Y. Ohsaki 和K. Hayashi 等人(2/231)还研究了两种不同地质条件的地面速度和速度反应谱，讨论了基岩场地的谱形特征。结果表明，硬岩石与软岩石上的反应速度没有显著差别。

T. Iwasaki 等人(2/183)由加速度记录的回归分析推出了用震级、震中距和场地条件表示的经验方程，可以从统计上估计最大的水平加速度，较大运动的持续时间和零交数。作者进一步建议将下卧层分为四类，震级和震中距各分五档，给出了不同情况的平均反应谱。

对场地土层考虑较细的方法是引入覆盖层厚度。例如，M. D. Trifunac (2/145)在原来估计拟速度谱的公式中引入了场地覆盖层厚度(h)，从而改善了估计精度，减小了离散性。其主要结论是：当周期T大于0.3秒时，速度谱的平均值随h而增加；但当T小于0.3秒时，变化不大。

B. D. Westermo (2/263)研究了持续时间与震级 M 、震中距 Δ 、烈度 I_{MM} 、运动频率(ω_c —滤波中心频率)和沉积层厚度 h 的关系。所用的模型方程为:

$$\text{Duration} = a(\omega_c) + b(\omega_c)M + c(\omega_c)\Delta + d(\omega_c)h$$

或 $\text{Duration} = a(\omega_c) + b(\omega_c)I_{MM} + c(\omega_c)h$

式中 $a(\omega_c)$, $b(\omega_c)$, $c(\omega_c)$, $d(\omega_c)$ 是统计系数。计算结果表明,对所有情况,持续时间均随沉积层厚度 h 增加而增加,而且低频增加较大,高频偏小。

G. Grünthal 和P. Bormann (2/169)用数字分析方法估计了分层土壤中地震波的放大作用,指出软土层的微细结构对谱值有重要影响。当模型的软土覆盖层中的弹性参数分布只有10—20%的不大变化时,可能引起与频率有关的地表观测幅值增加或减少150%。

F. A. Webster 等人(2/138)提出了加速度反应谱的光滑平均值模型,从统计和概率观点考虑了土质条件对地震动的影响。

M. Erdik (2/191)采用单自由度非线性滞后模型可以从理论上计算土层反应的一般图像,给出了二个实例,并与Joyner和Chen (1975)及Martin和Seed (1978)所给的结果作了比较。

王志良等人(2/379)研究了地震波由下卧基岩顶部向水平分层覆盖土传播的问题,介绍了土壤粘弹性模型和场地的地震反应计算方法。

(2) 局部地形效应

K. Irikura(2/175)研究了地形对地震动的影响,认为利用基岩露头获得的记录来估计基岩上的地震动输入时,还须考虑表面地形的影响。

F. K. Chang(2/207)考察了高程对美国1971年圣费尔南多地震的地面运动影响。作者根据二组资料用简单的比例方法推得:高程每增加一英尺,加速度和速度的峰值分别增加0.0007g和0.05914—0.06636厘米/秒。

简单地形效应可以进行理论计算。T. A. Esquivel等人(2/153)分析了输入为HS简谐平面波时,半圆形峡谷对土—桥结构的相互动力作用问题。在垂直入射情况下,有无峡谷的反应,其差别是不大的,但随入射方向与垂线夹角的增加,峡谷的存在将使反应增大。廖振鹏等人(2/161)研究了三维地形对地震动的影响。当地形简化成高为 H ,底半径为 R 的凸或凹截头圆锥体时,在 $H/R=1/3-2/3$ 范围内,山顶水平运动将放大100—400%,垂直向放大40—125%;凹地形上部边缘约放大20%。

(3) 不同区域地质构造的影响

众所周知,美国西部地区的强震资料不能直接用于美国中部和东部,这是不同区域具有不同地质构造和震源机制所致。C. B. Crouse和B. E. Turner(2/419)将日本的拟速度谱与美国的进行了比较,发现在高频部分日本的数据较高,而在低频部分无明显差异。D. E. Hudson(2/553)计算了美国西部和日本的水平加速度反应谱,发现两者的反应谱形状、量级和关于平均值的分布等都有许多相似之处,但日本的谱值较低。上述研究有利于将别国或某地区的资料用于另一国家或地区。

3. 近场地震动的特征

近来国际上对近场地震动的观测十分重视,关于震源附近地震动特征的研究也较多。根据第七届世界地震工程会议有关这方面的论文内容,可概述为如下四个方面。

(1) 近场地震动参数与震级和震中距的关系 Y. Sawada等人(2/239)利用日本震源附近基岩上的记录研究了加速度峰值、持续时间和频率特征,主要结果如下:

(i) 在震源距小于30公里的近场区, 水平分量的峰值加速度和速度可表示成震级 M 的函数:

$$\log AH_{\max} = 0.452M - 1.4$$

$$\log VH_{\max} = 0.595M - 3.59$$

(ii) 当持续时间定义为从剪切波到达峰值的 $1/2$ 和 $1/10$ 二种情况时, 它们与震级 M 的关系为:

$$\log T_{1/2} = 0.288M - 0.45$$

$$\log T_{1/10} = 0.232M - 0.89$$

(iii) 近场记录分析表明, 距断层近的记录, 高频分量占优势; 距断层远的记录, 低频分量颇大。

V. V. Shteinberg等人(2/373)利用美国、日本和欧洲较广泛的记录, 分析了加速度、位移及其反应谱、谱峰值周期等参数与震级、震中距的关系, 认为可以分成与近场和远场有关的两个区。近场区的界限大体等于断层长度的震中距。他的主要结论是: 在近场区, 当 $M > 6.0$ 时, 峰值加速度与震级、震中距的关系不大(见图1-2)。

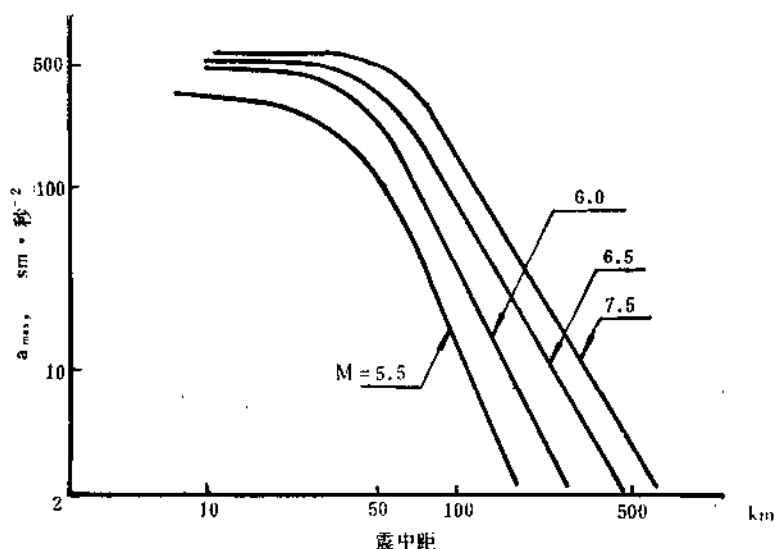


图1-2 峰值加速度与震级、震中距的关系

(2) 震源参数对地震动的影响

在这方面, Y. Sawada等人(2/239)关于应力降与峰值加速度关系的研究是值得重视的。他们利用图1-3表示了峰值加速度与 r/R (震源距/震源尺寸)的关系, 断定振幅与 r/R 成正比。作者发现, 当 r/R 为常数时, 似乎峰值加速度与应力降有关, 为了弄清这个趋势, 利用应力降将加速度参数化, 这样就减少了资料的离散性(见图1-4), 作者相信, 加速度峰值与应力降有密切关系, 并认为有必要积累应力降的区域分布资料。

D. Papastamatiou(2/443)研究了斯堪的那维亚内陆板块周围的近场地震动, 认为震源特征的差别不能用单一的震源参数(为震级)来研究。他建议用两个参数——地震距(或震级)与角频率, 并具体研究了分离的 P 波和 S 波的功率谱。与美国加州地震相比, 表明斯堪的那维亚的地震震源尺寸较小, 应力降较大。

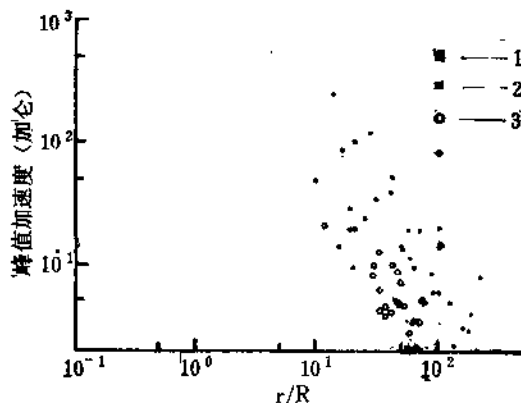


图 1-3 峰值加速度与 r/R 的关系

1—San Fernando EQ $4.3 < M < 5.0$; 2—Izu-Oshima-Kinkai EQ $1.2 < M < 2.5$; 3—Iwasaki EQ Swarm $2.3 < M < 3.0$ 。

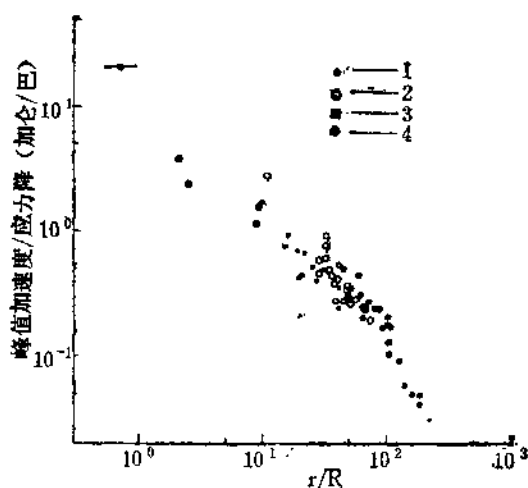


图 1-4 用应力降参数化的峰值加速度与 r/R 的关系

1—Izu-Oshima-Kinkai EQ; 2—Iwasaki EQ; 3—San Fernando EQ; 4—Off Miyagi Pref EQ。

郭玉学、彭克中(2/601)分析了唐山地震余震区的应力降分布与地震动富氏谱之间的关系,认为应力降可能是影响频谱形状的敏感参数之一。当地震发生于高应力降区时,加速度富氏谱在高频部分的幅值较高,反之,当地震发生于低应力降区时,其富氏谱在低频部分的幅值较高。

(3) 利用房屋和器物的反应估计近场地震动

到目前为止,震中区的记录还很少,距描述近场地震动清晰图像的要求还相差很远,因此有些人利用震中区的房屋和器物在地震时的反应估计了近场地震动参数。S. Yoshikawa(2/617)研究了日本震中区木屋的震害分布与位移反应谱的关系,并根据岩石中剪切波运动质点速度 V 与剪应变 γ 的关系 ($V = \gamma \times C$, C —波速),估计了近震源质点速度的可能值为 30—40 厘米/秒。

D. Papastamatiou 等人(2/451)利用一组供电变压器对 1976 年 5 月 6 日意大利北部 Friuli 地震的反应与近场强震记录的关系,推断该地震时重灾区的加速度峰值超过 $1.0g$,比主震时记录的最强的地震动大三倍。

(4) 估计近场地震动的其它方法

现在的理论地震学已能根据断层模型的位错估计地震动的时程。但是这个方法似乎只在有限的频带内可行,对地震工程起重要作用的周期小于 1 秒的地震动尚难使用。另一方面,目前尚缺少统计方法所需要的大量近场记录。考虑到上述限制, K. Ishida(2/427)提出了一种估计近场基岩最大速度的半经验方法。作者假定地面速度可以由低通和高通滤波的地震动叠加而成,且低通滤波的速度与用理论计算的周期为 1—2 秒的合成地震速度近似一样。作者建议近场第 j 次地震事件的绝对最大速度 $|\bar{V}^j_{\max}(t)|$ 可由下式计算

$$|\bar{V}^j_{\max}(t)| = |\bar{V}^j_{\text{syn}}(t)| + \Delta V^j$$

式中 $\Delta V^j = (V_{\text{EMP}}) - |V^j_{\text{syn}}(t)_{\max}|$ 。

这里 $|\bar{V}^j_{\text{syn}}(t)_{\max}|$ 和 $|V^j_{\text{syn}}(t)_{\max}|$ 分别为由简单传播的断层模型理论 (Haskell, 1969; Brune 1970) 确定的近场和远场合成速度的最大值。 (V_{EMP}) 是经验速度方程。作者将所得结

果与三次地震的观测值进行了比较,认为基岩上近场最大速度的平均值可以合理地估计出来,但也承认该方法还有待用更多的资料加以验证。

4. 与时间、频率和谱有关的地震动参数

不少学者力图寻求和应用与时间、频率、能量和谱有关的地震动参数。

(1) 有效峰值加速度

Y. Ohsaki 等人 (2/97) 认为峰值加速度是属于所谓尖峰型的信号,这样的讯号峰值与随机方法获得的值相差较大,建议采用有效峰值加速度,其确定方法如下:首先求出 5% 阻尼的 Housner 谱烈度 S_1 , 然后去掉所有大于阈值 A_s 的加速度,使具有阈值 A_s 的加速度图的 Housner 谱烈度为原来的 90%。最后的有效加速度 A_{ep} 由下式确定

$$A_{ep} = A_s \times 100/90$$

根据这个建议, Pacoima 坝东西分量 (峰值为 1055 厘米/秒²) 的有效加速度为 352 厘米/秒²。

(2) 强震持续时间

E. H. Vanmarcke 和 S. S. Lai (2/537) 研究了与加速度总能量、频率成分和卓越周期有关的强震持续时间的定义。地震动 $a(t)$ 的总能量为

$$I_0 = \int_0^{t_0} a^2(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} A^2(\omega) d\omega$$

式中 t_0 为记录 $a(t)$ 的总长度, $A(\omega)$ 是它的富里哀幅值谱。作者根据地震的功率谱 $G(\omega)$ 与 $A^2(\omega)$ 之间的关系,将地震动理想化为一段具有常量谱密度函数的有限持续时间的随机过程,并推导出如下公式:

$$I_0 = S_0 \sigma_0^2$$

式中 S_0 就是要确定的强震持续时间, σ_0 为均方根 (RMS) 加速度。当稳态强震时间为 S_0 时,稳态高斯随机函数理论给出了可能的峰值系数为:

$$r = \frac{a_{\max}}{\sigma_0} = \begin{cases} \sqrt{2 \ln(2S_0/T_0)} & S_0 \geq 1.36T_0 \\ \sqrt{2} & S_0 \leq 1.36T_0 \end{cases}$$

式中 $a_{\max}$ 为加速度峰值, T_0 为地震动的卓越周期。最后给出的强震持续时间表达式为:

$$S_0 = r^2 \frac{I_0}{a_{\max}^2}$$

如图 1-5 所示, S_0 与 $I_0/a_{\max}^2$ 接近线性关系,而且 r 值对最常见的卓越周期 ($T_0 = 0.2-0.6$ 秒) 甚不敏感。

(3) 时变谱的应用

G. C. Liang 和 C. M. Duke (2/561) 认为,时变谱 (The evolutionary spectrum) 可以同时描述加速度富里哀谱的幅值随时间和频率的变化 (见图 1-6), 是分析加速度记录的有用工具。他们对一组加速度记录完成了时变谱的分析,可以把加速度记录中的体波和表面波分开,发现许多土质场地的加速度记录包含有相当大的表面波能量。作者通过实例分析,表明时变谱在显示较多的地震信息、解释地震动特征、提供传播途径和局部场地效应图像以及制造人工地震动等方面可能发挥较大作用。

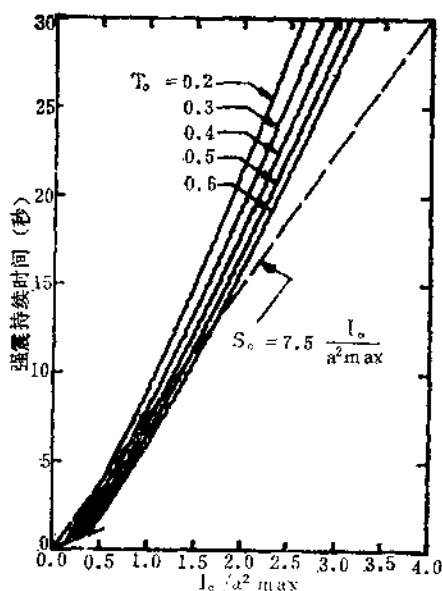


图1-5 强震持续时间与 $I_0/a^2_{\max}$ 的关系

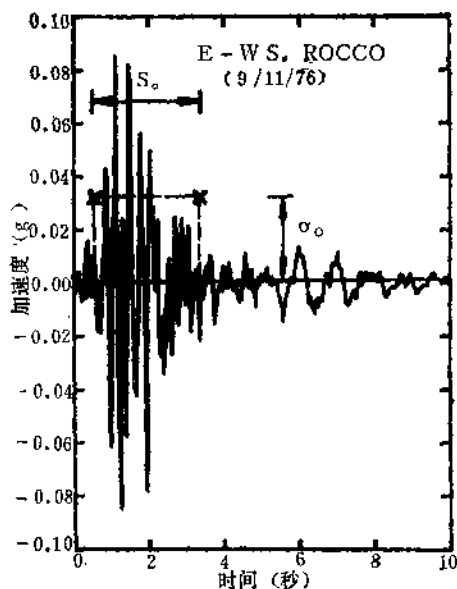


图1-6 加速度图 (S. Rocco Friuli地震)

图1-6中, $a_{\max} = 0.085 \text{ g}$; $I_0 = 2734$
厘米²/秒³; $r = 2.55$; $a_0 = 0.033 \text{ g}$;
 $S_0 = 2.6$ 秒。

(三) 模拟地震动

本届会议上, 对模拟地震动和人工地震动的报告与讨论比较活跃。有关论文指出的研究途径大致有三:

- (i) 利用实际地震动波形;
- (ii) 应用随机理论模型确定地震动;
- (iii) 理论地震图。

鉴于确定震源机制和传播途径特征的复杂性, 理论地震图法尚难于工程实践, 一般认为随机模拟方法比较合理可行。下面略举几个接近实用的例子来说明研究概况。

1. 地震能量叠加模型

R. D. Wheaton和R. M. Polivka (2/279) 应用非稳态的发生概率描述了地震动振幅, 并提出用能量叠加模型确定大地震的场地反应。用过去发生的小地震记录, 通过适当的叠加来确定大地震时, 要求遵守如下能量平衡条件:

$$E_s = \sum_{i=1}^n E_i$$

式中 E_i 为第 i 个被记录的小地震能量; E_s 为预计的大地震能量。

2. 考虑震级、震中距和局部场地条件的模拟地震

为了预测工程结构设计所用的地震动, H. Kameda等人 (2/295) 提出了考虑震级、震中距和局部场地条件的模拟模型, 他把具有非稳态频率含量的地震加速度表示为:

$$X_i(t) = \sum_{k=1}^m \sqrt{2G_x(t, \omega_k) \Delta\omega} \cdot \cos(\omega_k t + \phi_k)$$

这里, $G_x(t, \omega)$ 为时间 t 和频率 ω 的时变谱, $\omega_k = 2\pi f_i + (k-1)\Delta\omega$, $\Delta\omega = 2\pi(f_u - f_l)/(m-1)$, ϕ_k 为 $0-2\pi$ 内的独立随机相角。在他们的研究中, 上限及下限频率 f_u 和 f_l 分别定为 $f_u = 10.03$ 赫芝, $f_l = 0.13$ 赫芝, 且谐波分量数 m 和 $\Delta\omega$ 分别定为 $m = 1.66$, $\Delta\omega = 0.06$ 赫芝。作者给出了确定上式中有关参数的详细方法, 并根据特殊场地条件资料的获得程度将预测模型分为三级: 一级模型是预测地震动的基本模型, 根据已知的震级 M 和震中距 Δ 通过模型参数的回归分析给出。二级模型是已知震级 M 、震中距 Δ 和场地土壤剖面标准贯入锤击数 N 值的预测模型。三级模型是在二级模型的已知条件上又增加了场地的频率反应函数。上述逐步修正的明显效果是减少了模型参数的不定性, 而且随着资料的增加将给出更加可靠的预测模型。

Z. HASGÜR (2/327) 也研究了与场地条件有关的模型, 对每组上质情况, 根据有阻尼速度反应谱的特征将加速度记录分成为宽带和尖峰二种形式, 并给出了八个模拟强震记录。

3. 利用富里哀变换关系的随机模拟方法

日本的 T. Kubo 和 N. Suzuki (2/333) 给出了二种随机模拟模型。

模型 I 用实际地震运动产生富里哀相位函数, 用均匀分布随机数确定富里哀幅值, 即

$$g_i(t) = \sum_{n=0}^{N/2} a_{in} \cos(\omega_n t - \phi_{in}) \quad (i=1, 2, \dots)$$

式中 i 表示集合中第 i 个独立元素; a_{in} 是区间 $0-1$ 内均匀分布的随机数, 数值范围为 $0 \leq a_{in} \leq 1$ 。

模型 II——富里哀幅值函数由分析真实地震动记录定义, 富里哀相位函数为 $0-2\pi$ 间均匀分布的随机角, 时间函数为:

$$g_i(t) = \sum_{n=0}^{N/2} a_{in} \cos(\omega_n t - \phi_{in}) \quad (i=1, 2, \dots)$$

上式表示的过程不仅是稳定的, 而且也是各态历经的, 因此, 人工地震动可用上式的随机过程 $g_i(t)$ 和确定时间函数 (或强度函数) $\zeta(t)$ 之积表示为:

$$f_i(t) = \zeta(t) g_i(t)$$

作者对上述方法给出的人工运动与实际记录的速度反应谱进行了比较, 结果在中间周期处, 模型 I 所给的谱值比实际的偏小, 而模型 II 几乎在全频带上都符合的较好。

必须指出, 模拟地震动的具体方法和途径是多种多样的。除上述方法外, 还有 M. Ipek 的随机持续时间正弦波的叠加法 (2/319); M. Watabe, R. Iwasaki 和 M. T. Izuru 等人 (2/287) 关于三维地震动的模拟; M. W. McCann, H. C. Shah 和 R. J. Geller (2/349) 关于地震动谱的概率模型。从上述情况不难看出, 通过地震动模拟问题的研究, 估计未来地震动特征已有相当进展, 即可以给出地震动波形也可以给出地震设计谱。

二、地震活动性、区划和小区划

周 錫 元

(一) 地震活动性

在地震工程领域中,地震活动性的研究通常是与危险性分析,区划和小区划以至重要场地的设计地震动分析密切相关的。例如,日本 Ozaki〔1/217〕根据日本的地震活动性资料用统计方法研究了地面运动的地区性特征,预测了相应于 50、100、200 年重复周期的基岩运动。东德 Sponheuer 等人〔1/213〕简要地讨论了近代地壳水平变形与地震活动的关系,提出了一个区划图。Ergin 等人〔1/177〕为了研究土耳其第一个核电站场地的地震活动性,收集了场地周围半径为 450 公里范围内的历史数据和仪器记录数据,并进行了微震观测。他们对场地周围的复杂地质条件和地震环境作了详细的分析,指出了可能的潜在危险性。

水库地震问题看来也是有关地震活动性的一个重要议题。加拿大 Vladut〔1/17〕认为,水库蓄水后形成了一个新的渗滤源,并以此为基础建立了诱发地震的模型。他指出,一个稳定的流动增加了岩体的水压力,在地下渗透边界上产生水锤样压力而引起破坏。据说,这一概念已用于解释几个著名的水库地震。印度 Kumar 等人〔1/197〕在水库蓄水以前,研究了 Tehri 坝区的地震活动性。他们在水库周围设置了临时性的地震台网,求解了 88 个地震的位置和震源机制,试图查明蓄水以后地震活动性的可能变化。Padale 等人〔1/221〕研究了 Koyna 坝区的地震活动性,指出水库中水位的高低有类似于美国 Denver 井和 Rangeley 油田注水引起的地震控制作用。伊拉克 Alsinawi 等人〔1/241〕研究了 Derbendikham 坝址的地震活动性,他们从记录到的 78 个地震中挑选十个作了富氏谱分析,并指出了诱发地震与天然地震的差别。

这次会议上有些报告涉及到地震活动性与某些地质和地球物理现象的关系。纽约州立大学 Liu 等人〔1/102〕使用水压力通过孔隙的迁移模型研究了余震的释放规律,从而很好地解释了 1966 年 Parkfield 地震的余震时间序列。这一模型着重强调了孔压迁移机制与余震时间序列之间的关系。Mam 等人〔1/201〕在印度的两个场地上进行了地倾斜观测,分析了观测资料的变化与地震活动性的关系及其在地震危险性分析中的作用。土耳其 Silva〔1/209〕分析了南土耳其与东地中海欧亚-非洲板块边缘消减带和破裂区中地震活动的某些特点,指出了震源深度与板块构造的关系。

(二) 地震区划

地震区划往往是作为地震危险性估计的一种结果和实用形式提出来的,考虑的范围从全球一直到特定的工程场地,不过地震区划看来主要以国家和地区为对象,小区划则主要以城市为对象。全球性的地震区划首先是从保险事业中提出来的〔1/245〕。他们建议用 50 年一遇的修正的墨坎尼 (MM) 烈度作为区划的基础,以确定保险费中因地震所需增加的比率。他们从这个要求出发,提出了绘制一幅中南美洲区划图的初步建议。

从本届会议上的有关文章来看,凡是地震比较多的国家差不多都搞地震区划,方法也大