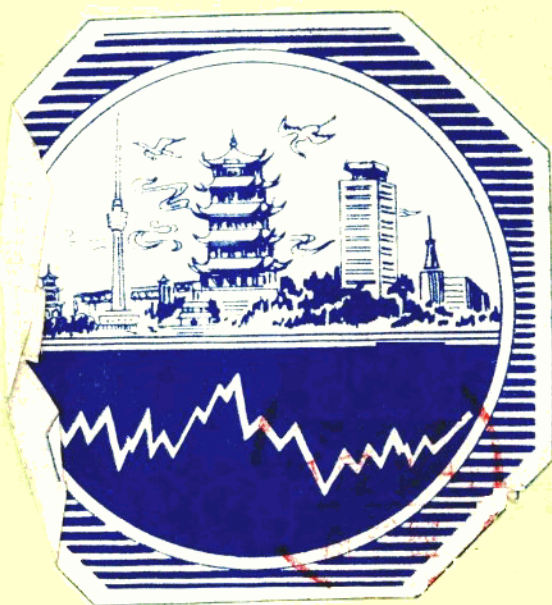


第二届全国地震工程学术会议论文集

(第二卷)



中国地震学会地震工程专业委员会
中国建筑学会地震工程学术委员会
武汉工业大学工程结构抗震研究所

主办
承办

武 汉

1987. 11. 9 ~ 14.

第二届全国地震工程学术会议
组织委员会

主任委员：刘恢先

副主任委员：胡聿贤 叶耀先

委员（以姓氏笔划为序）：

朱伯龙 刘志刚 李桂青 陈寿樑

陈厚群 沈聚敏 罗学海 徐宗和

徐植信 龚思礼 谢礼立

秘书长：李桂青（兼）

再论地震工程学的发展趋势

胡聿贤

国家地震局地球物理研究所、工程力学研究所

关键词：地震工程 地震动 强震观测 地震力理论 结构试验 抗震规范

摘 要

本文从地震宏观现象的新启示、地震动的观测与研究、地震力理论与实验研究的发展、地震作用及结构反应的概率方法、土工抗震的发展、抗震设计理论与规范的进展、和现存结构抗震鉴定和加固等七个方面总结了近二十五年国内外的进展。主要进展有：在研究范围上，已扩展到生命线等重大工程、现存建筑物、城市抗震防灾；在设计原则与方法上，已发展到多级抗震设计、强度与延性并重、结构控制与优化、专家系统、和模糊数学；在地震动上，已采用概率方法和空间多维震动。同时，还提出了作者对今后发展趋势的见解。

1962年刘恢先与笔者曾共同提出报告《地震工程学的发展趋势》，事隔四分之一世纪，再来总结一下这个问题，应该是有意义的。这二十五年中，国际上的发展很大。1962年前，仅开过两届世界地震工程会议，到现在则已经开过八届；一次会议的论文集也从三卷增到九卷，参加人数从五百增到一千五。二十五年前，地震工程学成长的标志是兴建了一批建筑工程，经受了地震的考验；这二十五年发展的主要标志则是成功地指导了核电站、生命线、海洋平台、超高层建筑、大型化工企业、大坝、大桥等重大工程的抗震设计。现在总结一下，可以加强信心，认清努力的方向。

一、地震宏观现象的新启示

宏观现象的深入分析始终是发展地震工程的重要手段。二十五年前总结的五条经验是：抗震设计是有效的，实际地震动大于设计规范的规定，刚性和柔性建筑都要合理设计，水平振动只是建筑物破坏因素之一，地基失效是软弱地基上房屋破坏的重要因素。这二十五年来发生的强震，除多次说明这些经验之外，还可以总结出以下一些新经验。

1. 地震长期预报有一定可靠性，但还要考虑意外大震

五十至一百年的地震长期预报主要以历史资料为根据，有一定的可靠性，其结果为地震危险性估计和区划，是工程抗震防灾的主要依据。但是，另一方面，不少事例说明意外的大地震也可能发生。我国1976年的唐山地震就是一个典型的教训。因此，还必须考虑大震的稀有、突发的随机特性，对经济与安全进行优化分析，作出工程决策。

2. 大城市要进行抗震防灾总体规划

由于生产发展、人口增长，大城市增大加多，不少城市受到强震破坏，如墨西哥、安科列奇、斯科普里、新泻、弗朗恰、唐山等。这些地震的经验反复说明抗震设防可以大为减轻震害。日美等多震大国都十分重视大城市的抗震防灾规划。美国总统科学顾问普莱士在1984年第八届世界地震工程会议上建议建立一个减轻自然灾害的十年国际合作计划，以地震灾害为主。一般认为，抗震防灾准备应包括长期措施与应急措施两类。

3. 生命线工程抗震问题的提出

1971年美国 San Fernando 地震接近已有抗震考虑的城市，有不少新的经验和教训。一个教训是生命线工程必须设防。所谓生命线指的是油、气、水、电等管线与交通、通讯有关的工程。这是七十年代提出的新名词。这类工程过去很少考虑抗震设计，所以在这次地震中

损失严重,在以后的多次地震中,也受到严重损失。

生命线工程的抗震有三个特点,故房屋建筑的经验不能直接用过来。第一,由长线组成的网络,有多个运行回路,局部破坏常不影响其余网络的正常使用。第二,大多是地下埋设管线,影响它的主要是沿管轴向的地震动差或相对变形,而不是一点的振动特性。第三,其震害影响涉及全区人民,而一栋房屋只影响一家人,它还是强震后应急救灾所必需。

二、地震动的观测和研究

1. 观测台站和记录

这一时期,强震观测发展迅速,已遍及世界各大洲,观测台站从六十年代的几十台发展到六千余台,美日两国各有近三千台,墨西哥、中国、意大利、新西兰各几百。所取得的有工程意义的记录数与台数相近,1980年约千条,1983年增至三千,1986年增至六千,平均每年增加六、七百。重大的成就可以归纳为以下几点。

(1) 记录到不少大加速度值 Housner 曾估计过地震动最大的加速度值约为 $0.5g$,他着眼于主要周期接近一般房屋自振周期的地震动。现在已记录到不少更大的值,如,1971年美国 San Fernando 6.6 级地震为 $1.25g$,1973年苏联 Gazli 7.2 级地震为 $1.3g$,1979年美国 Imperial Valley 6.6 级地震为 $1.7g$,几乎与日俱增,快接近有人预言的 $2g$ 了。这样大的加速度都是与高于 10 赫的地震动相联系的,对一般结构影响不大。产生这样大的加速度的原因之一是破裂传播方向指向记录地点的 Doppler 效应。

(2) 观测台阵的发展 六十年代的地震动观测大多是单台式的,只有在结构物上的才是台阵式的。到八十年代,发展了许多密集型台阵,一个台阵常由十台以上的观测点所组成,多时可达六十多台。线状台阵最多,有的垂直于一条活断层,用以观测地震动随断层距离的变化;有的沿断层布置,用以观测断层附近的地震动;有的兼有两种目的;此外,还有面状台阵,观测点间距常在几百米以内,用以观测地震动在面上的变化;还有三维台阵,用以了解地下地震动的变化。不少台阵已经取得了良好的记录,对结构多点输入、地震动衰减关系、地下结构、地基变形、地震波传播、和地震动随机特性等问题,已经或即将起重要作用。

(3) 数字化强震仪的开发和应用 七十年代开发了数字化强震仪,利用现代电子技术,在仪器中采用数字记录,加宽了通频带、增益自动可调、分辨率高、有绝对时间、数据处理方便,大大提高了精度,特别是长周期的精度;又由于采用了记忆装置,改善了记录丢头的缺点。最新式的数字强震仪并革除了全部机械元件,记录可以不经转换而直接上机进行分析。美国于1974年、日本于1978年开始用这种仪器。我国已用这种仪器取得了两百多条记录。这种新型仪器的进一步发展将可同时满足地震学与地震工程学两者的要求,其发展和普及是必然的趋势。存在的主要问题是它对恶劣气候条件的适应能力较差。

(4) 一次大地震得到的大量记录 一次地震若能在大面积上得到大量记录,可用以了解地震动场的分布,研究不同场地、不同方位地震动的变化,可以为地震学提出近场地震动数据,用以研究震源特性和断层破裂过程。这是一个地震学和地震工程学共同感兴趣的问题,今后必然会受到更多的注意。1971年 San Fernando 地震,有近百台加速度仪得到了良好记录;1979年美国和墨西哥边境 Imperial Valley 地震,两国共得到近四十台记录。美国和日本一次地震取得十台以上记录者多达几十次,我国也有一次,都是七十年代以来的事。

2. 地震动特性的深入认识

(1) 加速度峰值 a 的饱和 加速度饱和有两个含意。第一, a 随震中距趋近于零而趋近常数。震源释能区是一个大的体积。假若 a 是一点到能量释放中心(能中距)的函数,当震中距趋近于零时,能中距趋近于常数,故 a 亦趋近于常数,即饱和。第二,震中的 a 值随震级 M 增至很大而饱和,这是由于震级增至一定值($M=6-7$)后,震源体的增大主要靠水平长度的增加,离断层边某一点较远的断层破裂对这一点的地震动加速度不起多大作用之故。

(2) 震级饱和、矩震级和谐震级 由于所用仪器频率特性的限制,现在通用的震级各为一个特定频率范围的谱所定义,地方震级在 1 秒左右,体波震级在 1-10 秒,面波震级在 20 秒左右。其意图是想用震源谱某一窄频带谱值来描述地震的大小。然而震源的能量是按一定的谱释放的,地震大小不同,谱形亦不同,大则长周期分量多,就象反应谱一样。因此,震源谱的一个座标值不能描述整个谱。随地震加大到一定值之后,震源谱高频部份趋向饱和,故地方震级也出

现饱和。为此,金森博雄和Hanks提出用矩震级来描述地震的大小就像Housner用反应谱面积定义的谱强度来描述地震动强弱一样。矩震级是用与震源释放的总能量有关的地震矩转换而来的,它不会饱和。这一改进简单可行,已在工程地震中得到应用。为根本解决这个问题,十余年前,西德的Duda提出用谱震级代替常用的震级,就象用反应谱代替加速度一样。谱震级的概念迟早会在地震学中应用。当前的问题是缺乏一个确定震源谱的有效方法。

(3) 有效峰值的应用 六十年代,人们在设计中将地震动、结构反应和安全因数三者分开,地震动用加速度峰值,结构反应用反应谱。但是,人们认识到很大的加速度峰值对结构反应不起重要作用,从而研究各种有效峰值。七十年代美国ACT-3规范中采用了从反应谱定义的有效峰值加速度EPA与速度EPV,它们分别为5%阻尼比绝对加速度反应谱高频(0.3秒附近)和中频(1秒附近)段的平均值的1/2.5倍。

3. 地震动的估计

(1) 场地地震相关反应谱 近二十年地震动数据迅速积累,已有大量数据分布于震级 $M=5-7.5$ 和距离 $R=10-200$ 公里范围内。根据这些记录,提出了可供实用的反应谱SA与震级 M 、距离 R 和场地的函数关系 $SA(T, \xi; M, R, \text{场地})$ 。这样得到的反应谱是场地地震相关的,以区别于不变的标准反应谱。标准反应谱引入时只有几十条加速度记录,自不足以研究场地影响。这里处理场地影响的方法是将场地分为三或四类,按这些类分别统计反应谱。另一种考虑场地影响的方法是先确定基岩反应谱 $SA(T, \xi; M, R, \text{基岩})$,再计算场地的影响。这种方法可以详细而具体地考虑特定场地的影响,不是简单的场地分区。现在,地震相关反应谱已开始应用,特别是在重大工程中;场地相关反应谱已广泛用于一般工程;场地条件具体计算方法多用于重大工程和大城市小区划。

(2) 缺乏强震加速度记录地区的地震动估计 由于缺乏强震加速度记录的地区常有地震烈度数据,如何将烈度转换为工程需要的加速就是一个重要的实际问题。在过去的二十五年中,许多中外学者仍然在研究烈度与地震动的关系,他们得到的结果是一样的,即,平均而言,烈度相差一度,加速度或速度的峰值大致相差一倍,但同一烈度所对应的这些值却可以相差几十倍甚至百倍之多。这么大的离散是谁都不能满意的。

近十年来,人们已经认识到,在同一烈度内,小震近震的加速度常大于大震远震,因为后者的速度较大、持时较长,更容易引起震害,故加速度较小。为此,国内外研究者提出了改进的烈度与地震动换算关系,即在烈度与地震动之外,再引入第三个量,如震级或距离,用以表示地震环境,以克服原来关系不区分大震远震与小震近震的缺点。

(3) 地震动的理论计算 根据震源断力学或运动学过程,用数学力学方法,计算近场地震动过程的尝试起于六、七十年代,当时仅能对地表位移的主要特征得到合理的近似;到七十年代后期,可以对速度过程取得近似的结果;只是到八十年代,才着眼于加速度,并取得初步结果。现行的计算步骤是,根据地区特性,估计地震断层的走向及破裂特征(错动方式及应力降);根据震级大小,估计断裂面积及位移值,从而将断裂面划分为若干个单元;根据理论计算模式及地震动衰减,计算单元破裂引起的地震动;根据单元破裂先后的假定,计算整个断裂引起的地震动。关键问题之一是如何求得单元破裂引起的地震动,过去主要依靠理论计算,近十年提出用从余震得到的小震加速度过程。第二个关键问题是单元破裂的先后及每个单元位错的大小,有人用试凑方法,有人用随机方法,但大多考虑简单的破裂传播方向。这是一个还在研究发展中的领域,我国也有一些可喜的成果。

4. 地震区划

(1) 地震区划指标与原则

五十年代的地震区划以地震烈度为指标,今天,区划指标大多已改为地震动加速度,几乎所有地震危险较大的国家和地区都有了地震区划图。同时,区划的原则也从确定性的发展为概率性的,区划图中给出的是给定超越概率的地震动参数的等值线。这一原则几乎已在全世界通行。近十年来发展的趋势是同时用地震动加速度与速度两个指标,从而具有了反应谱的意义;它开始于美国ATC-3规范,后用于加拿大等国的区划图和抗震设计规范。我国即将批准的1987建筑抗震设计规范也采用了随地震远近而改变的反应谱,具有相似的意义。

地震区划的概率方法有两种形式。一种以地震烈度或加速度的统计为对象,可称为直接统计法;另一种以地震为统计对象,可称为地震危险性法。直接统计法先根据历史地震的震中和震级以及地震动衰减规律,计算区内各地点(常按经纬度一或半度分成网格点)的地震烈

度, 设已知其概率分布, 即可计算出各点在给定超越概率下的地震动值, 根据这些值, 最后可以绘出等值线, 即为区划图。日本常用此法。后述的地震危险性法着重于各个环节的概率性, 特别是直接研究地震发生的随机性, 容易发现客观规律。此法当是今后发展的主流。

(2) 地震小区划 小区划考虑的是一个小区内的地震危险度分布, 以一城、一工业基地这样的小地区为对象。六十年代以后, 人们从设计的观点认识到, 局部土壤条件主要是影响反应谱的形状, 应按场地条件调整反应谱。这时, 小区划的结果就是场地分类。到八十年代, 由于地基反应分析方法基本统一, 地震危险性分析也已广泛应用, 进一步的发展使小区划有了三种含意。第一, 要求更细致地研究对小区有影响的地震活动情况; 第二, 用地基反应计算方法, 研究局部地质构造、土壤、地形对地震动的影响; 第三, 要求在地震动小区划之外, 进行地基失效小区划, 如断层错位、砂土液化、滑坡、地基变形等。我国已按此进行过许多城市和工矿企业的小区划。当前存在的问题是地基失效小区划是确定性的, 而地震动小区划是随机的, 两者不统一。

三、地震力理论与实验研究的发展

1. 弹性反应分析

(1) 频域分析 由于电子计算机的大发展, 人们对可以对几千个自由度的三维、地基-结构相互作用等复杂结构体系进行时程反应分析。又由于地基反应参数是频率的函数, 时域分析有很大困难, 所以频域分析在这二十年中得到了应有的发展。当然, 快速傅里叶变换 FFT 算法起了重要作用。时域频域分析的并行发展也加深了人们对振动问题的认识。

(2) 反应谱只说对了一半 真正动力法要求计算出结构物的全部动力反应过程, 而不只是其最大值。自从1971年 San Fernando 地震后, 由于有些已按当时规范设计的建筑还是受到了破坏, 使人们认识到反应谱这种等效静力法只说对了一半, 另一半是, 地震是一个动力作用, 而且地震动的其它许多因素如持时、大脉冲等也可能有影响, 要真正了解结构的地震反应, 就需要进行动力分析, 对重大或特殊的结构, 更是如此。

(3) 振型组合 弹性分析反应谱法仍然是大型结构常用方法之一。在特征值方面, 主要的进展是提出了一些新方法, 如子空间迭代和二次型缩减, 可以经济地处理自由度很大的体系的动力反应分析。在振型反应的组合方面, 由于考虑的自由度很大, 又常同时考虑二维和扭转振动, 经常出现振型反应偶联的现象, 因而出现以理论为基础的完全二次型组合法 CQC 和以数值计算统计经验方法, 都能给出良好的结果。

(4) 地基-结构相互作用 地基-结构相互作用过去认为影响不大, 近二十年来, 有了新的认识。对于大坝、深埋结构、桩基建筑等大质量和大刚度的体系, 相互作用显著。一般而言, 相互作用的影响会压低地震动的高频部份, 加长结构物的自振周期, 并使结构物在基础处产生水平和竖向的移动和转动。上部结构刚性愈大, 相互作用就愈大。

相互作用的计算方法可以分为两类, 即直接法与子结构法。它们一般分为四个步骤, 即: 输入地震动, 地基与结构两部份的分析模型, 体系的动力学参数, 体系的动力反应计算。对这四个步骤的不同处理就形成了不同的方法。当前研究的问题有: 复杂计算的简化, 如半空间结构的理论解与有限元的应用; 使计算模型更符合实际; 计算的不确定性分析; 子结构振型法等。这两大类方法都有了不少计算程序, 重要的问题在于正确应用这些程序, 才能得到正确的结果。现在, 在地震动输入中, 已可考虑空间各点的地震动相关性、地下地震动的变化以及不同波型的波引起的振动。由于地基介质不均匀, 其影响自应研究。

(5) 多点输入的结构反应 对于长跨桥、空间管道、大坝等大型结构, 由于支承点相距远或面积大, 需要考虑各支承点地震动的差异。近十余年来, 不但已提出结构反应的计算方法, 而且又从密集观测台阵开始得到空间相关的地震动数据。

2. 非弹性地震反应

(1) 低周疲劳 地震工程中考虑的疲劳问题指的是重复次数在几十至几百次的低周疲劳破坏。砂土地震液化是最早在工程中考虑的低周疲劳问题。结构物低周疲劳研究较多的是钢结构节点焊缝开裂或构件与薄壁的屈曲失稳、钢筋混凝土构件的开裂、钢筋塑性变形等问题。这些成果已在八十年代初得到应用。试验研究结果表明, 结构低周疲劳强度取决于两种抗力, 即一次荷载作用下的极限强度或变形和每一周循环荷载下的耗能能力。洪华生等分析

了地震反应中结构的疲劳破坏。现有研究结果充分说明地震动的振幅、频率、持时等三要素在低周疲劳中的重要作用，前两者主要影响结构的应变能，而持时主要影响累积耗能。

(2) 等效线性化 近二十年的研究结果表明，就结构总体反应而言，等效线性化可以用于很强的非线性，当延性系数达10—20时，仍能给出满意的结果。此简化方法可以考虑结构软化引起的周期加长，也可以近似地估计反应的重复系数，从而研究低周疲劳破坏。

4. 结构试验设备和实验研究

在计算机发展的今天，理论计算分析可以处理复杂的结构模型，从而更需实验研究来提供所需要的参数数值。可以认为，现在开始出现了理论、计算、试验三者相结合的趋势。

(1) 材料和构件的动力性能 Housner 等人1969年曾指出过，实验研究应包括三项工作，即：结构材料的应力应变关系与耗能特性，均作为应变、应变率、变形历史的函数；典型梁与柱单元的动循环试验以确定强度、刚度、延性和其它重要特性，并与根据材料性能估计的结果对比；对梁柱组合单元进行动力和伪静力试验，以研究如何从构件单元的性能来估计组合单元的动力特性，从而研究从组合单元估计整个结构的动力特性，从实验室的小比例尺试验结果，外推现场真实结构的地震反应。近二十年进行了大量的钢构件、钢筋混凝土构件、砖墙与构件组合的伪静力试验，直至破坏。据此提出了多种恢复力模型，可以考虑混凝土开裂、钢筋滑移或塑性变形、局部失稳等退化作用，以及接近破坏阶段的失稳现象。

(2) 试验方法与设备的进展 这一进展的标志是模拟地震动的大型振动台及伪动力试验设备装置的普遍应用。现在，国际上已有 15×15 米的三向台和较小的六向台。这种台以美国最早，日本后来居上，又大又多，我国也有了几台四或五米见方的。在这种台上可以进行原形的小结构物和大比例尺建筑物模型的破坏试验。大台的真正动力试验虽然弥补了伪静力试验的不足，但这种设备的投资过大，维持运转费用也很高，仍不足以进行一栋真实建筑物的试验。为此，近十年来又发展了一种伪动力试验。它与伪静力的主要差别在于它将计算机与试验设备联在一起，从而可以将计算与试验联在一起。它在试验过程中，用计算机控制，既对各构件的动力反应进行大量测量和应力应变关系的计算，又对结构总体在给定地震动的下一步反应进行计算，并指挥激振器将此反应施加到结构上去。试验中，总体的反应是由多个激振器分别施加于相应楼板处的。和伪静力相比，它可以用实测的应力应变关系来计算结构的地震反应；和大台试验相比，它比较经济，且可进行大比例尺模型试验。日美正在继续的联合大型试验计划同时进行同一结构的伪静力、伪动力和大台模拟地震试验结果说明，伪动力试验是有意义的。它在计算机时代必将进一步发展。

(3) 结构识别 和伪动力是伪静力试验在计算机时代的自然发展一样，结构识别是结构试验数据分析方法的自然发展。在五、六十年代的分析中，人们一般利用共振谱或功率谱的峰点和宽度来求结构物的自振周期、阻尼、振型，从而推算结构物的刚度，只利用部份试验资料，而丢掉其它信息。随着计算机的发展，结构识别或系统辨识已在地震工程中得到了广泛的应用。它可以用来分析实验室数据或现场地震记录，可以从中提炼出比自振特性更多的信息，也可以分析非线性振动试验结果。

(4) 结构振动控制 由于逐步认识到结构耗能能力的重要作用，二十年来提出了不少实际可行的耗能构造，如适用于钢架结构的偏心斜支撑，一反设计常规地使斜支撑点移向梁内，而不通过梁柱节点中心，以便利用梁的弯曲塑性变形；或采用抗震支撑吸能构造，利用交叉斜撑之间的特殊措施，使它在变形时产生塑性变形或局部断裂而破坏，以消耗能量。又如在墙中设置竖缝，利用墙平面内变形时缝两侧相对摩擦的耗能；或用竖缝将结构分为间隙小的多个部分，利用地震时的相互碰撞的耗能。隔振是一个古老的概念，近二十年来却有了实用的进展，欧洲、美国、新西兰都有了商用的隔振基础。它们一般用橡胶与钢板的互层制成基础隔振元件，或加石墨芯轴，已初见试用。如美国加州圣安德烈斯断层附近的一栋大楼，面积达二万五平方米，用了近百个这样的隔振元件。我国在研究用天然砂水平薄层作为简单的隔振措施。还有用滚轴作隔振基础的，如法国设计的核电站。隔振基础还可以与耗能措施同时采用，以控制滑动基础可能

(5) 模糊数学的应用 地震工程中常用一些主观的量，如地震烈度、地基分类、房屋破坏等级、房屋质量优劣等等，在近代数学中，都称为模糊量，应该用模糊数学处理。国际上开始于七十年代，我国在八十年代初也有很大发展。应用的主要方面是地震烈度的有关问题，如烈度的综合评定和衰减；也有涉及在模糊地震动输入下的结构模糊反应或模糊随机反

应的。由于主观的模糊量会在地震工程中存在，所以模糊数学的应用应该受到重视。

四、地震作用及结构反应的概率方法

此方法发展于六十年代初，当时的重点是地震动的描述和结构反应分析。这二十年来的进展提出了一整套结构地震反应危害性分析的概念和方法。其基本思想可用下式表示。

体系危险性 = 地震危险性 × 体系易损性 × 危害后果

1. 地震危险性 六十年代末，工程师们提出了一种地震危险性分析方法，假定地震的发生符合泊松规律，在时间域和地震带内是均匀的，再利用地震动衰减关系，即可估计某一场地在结构寿命中地震动超过不同值的概率。Cornell 提出的模型将一次地震看作是点源，洪华生看作是有限破裂源 Shah 又引入 Bayes 条件概率用以考虑其它主观判断的因素，如地质条件对地震的影响。到七、八十年代，这一方法已得到广泛应用，成为重大工程和地震区划的重要方法。当前的问题是考虑地震发生的时空不均匀性以及缺少加速度记录地区的地震动估计。

2. 体系易损性

此研究始于七十年代。它用一个概率矩阵来表示体系的抗震能力。研究得最早最多的是常见的房屋，根据历史震害数据，用统计方法求得某一烈度时这种房屋出现不同破坏程度的概率分布，不同烈度下的各种破坏程度的概率分布就构成了体系的易损性。易损性是体系本身的特性，与所处的地震环境无关，而体系震害程度(=地震危险性×体系易损性)则表示某一地点的震害概率分布。对于复杂的和不常见的体系，如架空管道和社会功能，其估计大多依赖于合理模型的理论分析。今后的任务是更好地确定各种体系的易损性。

3. 危害后果或危害性

危害后果有两个独立的指标，即经济损失和人身伤亡，其中包括体系破坏所引起的一切直接和间接后果，如可能的火、水灾、劳动力损失引起的生产损失，由这一生产损失引起的其它生产损失和社会功能失调的损失等等。

4. 工程决策与优化

体系或结构危险性分析是为抗震设计和防灾服务的。由于地震的发生是随机性很强的稀有事件，在抗震设防中要求完全无损是不现实的，而只能在可能的损失与设防投资之间寻求折衷统一或优化。过去，这种优化是经验性的。这一时期的发展形成了一个分支，即工程决策与优化。优化是对某一问题进行最优选择。先定义一个受益函数作为目标函数，优化的目的是使目标函数取极值。当一问题在重要步骤中需要主观判断时，即为工程决策。近十年中，工程决策的新发展是专家系统，即将专家的经验存入计算机中，利用计算机实现人工智能，进行决策判断。此法开始在地震工程中有所应用。

5. 结构随机反应与可靠度分析

(1) 地震动的随机描述 结构反应的随机性来自地震动，地震动随机描述的主要进展在空间和人造地震动。在空间地震动方面，对于一点的地震动，提出了在三个互相垂直的主轴上不相关、和根据平移估计扭转地震动的方法，以及强度与频率的非平稳模型；对于空间不同点的地震动，提出了相关性和随机场的概念。在人造地震动方面，已经有了与上述认识相应的计算程序，可以满足给定的地震动峰值、谱与持时，以及相位谱在非平稳性中的利用。另外，还找到了反应谱与功率谱的关系。

(2) 首通问题或可靠性分析 首通问题是一个随机过程 $y(t)$ 在时间区 $0 < t < T$ 中保持在或首次通过给定界限的概率 $L(T)$ 。较成熟的结果是对平稳高斯过程的，有时还进一步限制为宽频带或白噪声输入下的小阻尼线性反应。这时，近似解可以简化为

$$L(t) = A \exp(-\alpha T)$$

这里，参数 A 和 α 决定于体系和输入的特性。这一结果对宽带反应偏于危险，对窄带则偏于安全。Vanmarcke 根据两态马尔可夫过程理论，得到了 A 与 α 的简单表达式，适用于各种带宽。Crandell, Yang, Lutes, Choteski 等报导过非平稳反应的首通问题。李桂青等求得了小阻尼、弱非线性体系在宽带平稳干扰下反应的近似解析表达式。

五、 土工抗震的发展

1. 砂土液化

这二十年来的试验和现场经验使人们大体上了解了液化的机理,能有一定把握地预测地震时地下砂层是否会液化。一般的经验是,地表 0—15 米内的饱和松散粉细砂层和含有不多粘粒的这种砂层是容易液化的。液化的判别可以用砂土的相对密度或标贯击数、围压、地震动的大小和持时(循环周数或震级)。除了判断液化外,现在还进而注意到液化影响的大小。这些经验已用于我国的抗震规范。

2. 土壤动力性能

土壤动力性能的研究成果主要在六、七十年代,自从有了三轴仪,就得到了大批数据。Seed 和 Hardin 等人总结出一些简单实用的规律,注意到土壤的强烈非线性,将土壤的刚度和阻尼这两个重要动力参数作为剪应变的函数。由于土壤是一种极不均一的材料,参数的具体数值应通过试验确定。

3. 地基地震反应

由于土壤的强烈非线性,地基反应特性,如传递函数,是地震输入的函数。因此,先要根据场地周围的地震环境估计场地基岩地表的地震动,再考虑具体地基土壤的非线性,用数值计算方法求出场地地基的地震反应。到八十年代,这一方法已得到广泛应用。日本核电站抗震规程采用此法确定场地的设计地震动,并用此法进行过大城市的地震小区划或假想未来地震引起的地表震动。这种方法可以考虑具体的场地条件,比简单的地基分类更能反应特殊场地条件的影响,如墨西哥市。我国上海、天津等沿海大城市可能也有此情况。进一步发展中的问题是如何更好地处理基岩地震动输入、和考虑地基介一值不确定性的影响。

4. 地下管道

1964年新泻地震中地下管道震害严重,此后又不断地取得新的经验。常见的破坏是管道接头拉裂和薄壁管道局部屈曲失稳。从此,人们认识到,地下管道的破坏来自地基的相对变形,而不是惯性力,与地上结构的破坏完全不同,故有的规范早在七十年代初就规定地基管道抗震设计以地基的变形为主。由于软弱和不均匀地基容易产生较大的相对变形,所以这些地基下的埋设管道破坏较大。其抗震措施是加强管道的变形能力,即管道与接头的延性,如金属材料优于陶磁、柔性接头优于刚性、细管优于粗管。

六、 抗震设计理论与规范的进展

这二十年来,除反应谱理论有了很大发展之外,非线性、概率可靠度、动力、耗能隔振、低周疲劳等理论都有了实际应用,并在设计原则上有了更为明确的抗震设防目标。

1. 地震动的深入考虑

(1) 地震场地相关反应谱 在规范中考虑地震相关反应谱的可能以ATC-3为最早,接着有日本核电抗震规程,以后有1985年加拿大规范;至于场地相关反应谱,则以墨西哥和我国为最早,美国与日本则晚了十年才提出类似的结果,苏联则在八十年代初才作出相应的改变。同时考虑两种反应谱的只有ATC-3、日本的核电规程和我国即将批准的1987规范。

(2) 地震动参数的广泛应用 二十年来,规范中有关地震动的规定由简单到详细,对一般结构,只要求按现行规定,考虑加速度和反应谱进行等效静力法计算;对于重大工程,则要求给出加速度、反应谱、持时,和地震动过程,进行动力计算。除了水平地震动之外,规范更加重视竖向与扭转地震分量的影响,特别是在大震的震中区,并用偶然偏心的形式来考虑可能的扭转地震动。

2. 极限状态设计原则

到八十年代初,少数先进抗震规范采用了极限状态设计原则,其中包括我国即将批准的规范。这一设计原则要求结构满足不同的使用极限状态,如正常使用状态、可修极限状态、倒塌极限状态;与此三级极限状态相应的地震动常称为小震、中震、大震。在工程使用寿命中,小震是少遇的,中震的极少遇的,大震是不大可能的。小震时,要求工程结构不经修理仍可正常使用;大震时,要求工程结构虽然破坏严重,但不致倒塌伤人或砸坏贵重设备。日

本定义小震为 $0.2g$ ，大震为 $1.0g$ ；我国定义（基本烈度 - 1.55 度）相应的加速度为小震，其四至六倍为大震，与基本烈度相应的为中震。小震按弹性理论设计，从而确定结构的强度，以保证无损坏；大震按非弹性理论设计，确定结构的延性，以保证不倒塌。尚待进一步考虑的问题是如何科学地定义小、中、大震。

3. 延性的明确考虑

人们早已认识到结构抗震能力是由强度和变形两者共同决定的，只有强度而无足够塑性变形能力的结构，在遇到超过设计的地震时，容易因脆性破坏而突然倒塌；据有较低强度、但有足够延性的结构，虽然较早出现损坏，但可避免倒塌。因此，许多规范规定要防止脆性破坏，如，混凝土的剪切破坏与钢构件、钢筋的屈曲失稳。美国的Vertero教授在提创概念设计时，除了强调规范的不足和一些不确定因素之外，特别强调了延性。加强延性的方法是在保有强度的前提下，加强变形能力，如多道设防、加强吸能能力、防止脆性破坏等。

七、 现存结构的抗震鉴定和加固

这是近二十年来普遍重视的问题。多次强震经验证明，按照抗震规范兴建的工程的抗震能力一般是令人满意的；而现存的旧建筑物大都无抗震考虑，是地震灾害的主要根源。我国自邢台地震以来在许多地震危险区开展了现存建筑物的鉴定和加固工作，并在七十年代中制定了规程。美国 ATC-3 规范首次将此项目纳入设计规范。日本近来也大量开展了这一工作。实际强震的经验证明，这一工作的效果极为明显。我国在这一方面的努力是很大的，在过去几年中，每年专项投资约一亿元于几十个大中城市。

抗震鉴定大多采用近似估算法。加固措施主要在加强结构的整体性和补强薄弱环节。主要困难在于老旧房屋数量大，如何在城市的发展中有计划地更新或加固，是一个复杂问题。

八、 结语

从上述分析可见，这二十年来地震工程的发展有几个特点。在研究内容上，由单一的结构抗震扩展到综合的抗震防灾与救灾，由建筑物到包括生命线、化工设备、核电站等多种近代工程；由地上结构到地下管线；由新建工程到老旧的现存结构。在设计原则与分析方法上，由简单的强度设计发展到全面的概念设计；由线性的强度理论到非线性的延性耗能理论；由单一级别的设计到极限状态的多级设计；由等效静力法或反应谱法发展到时程分析法；由只考虑上部结构到土结相互作用的整体分析；由上部结构的惯性力到地下管道的变形；在理论上，又引入了可靠性与优化、工程决策、系统辨识、模糊数学和专家系统；由原始的手工操作到计算机程序化。在地震动输入上，由简单的烈度或加速度发展到随地震和场地环境而变的反应谱与持时共同决定的加速度过程；由经验的确定性方法到概率的危险性分析法来确定地震动；由单点的水平移动到同时考虑空间多点的竖向、行波、扭转震动。凡此种种发展都是与近代工业、科学技术的发展和提高相联系的。

从过去和现在看未来，在今后二十年内，地震工程的发展趋势可能是：接受地震长期预报的水平，从概率的观点，用优化和工程决策的方法，发展一套完整的抗震防灾对策，其主要内容有：第一，在地震动的估计上，要充分注意到地震的不确定性及其未来的地震与场地环境，估计地震动的强度、频谱与持时的超越概率；第二，在结构抗震能力上，要考虑结构的强度、延性变形、与低周疲劳等各种破坏阶段的概率，特别是倒塌阶段，包括结构分析中的各种不确定性；第三，在设计原则上，要进一步发展多种极限状态的概念，以安全与经济相统一的工程决策为依据；第四，在工程技术措施上，要采用经济可行的隔振消能的被动和主动结构控制；第五，在组织措施上，将出现地质、地震、工程、管理的密切结合，统一考虑地震预报、工程抗震、抗震防灾的综合计划，使地震工程形成一个完整的学科。

抗震结构最优设防水平的模糊决策

武爱虎 王光远

哈尔滨建筑工程学院

摘 要

对于许多特殊的结构物，都要进行专门的抗震分析，以求得合适的抗震设防水平。本文应用模糊效用函数^[1]建立了更为合理的抗震设防准则，而且还能有效地分析综合各种有关的确定性和模糊性的因素。在此基础上提出了抗震结构最优设防水平的模糊决策方法。

关键词：震害危险性分析 模糊效用 抗震设防水平 模糊决策

一、前 言

在地震活动区，必须考虑新建结构物的抗震设防问题。决定抗震设防水平的一个主要因素是设计地震荷载的大小，或者说是设计地震烈度的等级。本文所说的抗震设防水平就是指这种设计地震荷载。一般情况下，可以按照建筑结构抗震设计规范去选择设防水平，但是对于许多特殊的结构物，就要进行专门的分析，进而优选合理的设防水平。本文就是针对这些特殊情况提出了一种优选抗震设防水平的模糊决策方法。

决策最优设防水平要解决的主要问题有：1、采用什么样的决策准则；

2、如何分析预测一个结构初始设计方案的震害；3、用什么方法将决策准则形式化；4、决策中涉及到许多确定性的、随机性的和模糊性的因素，用什么方法才能有效而合理地分析综合它们。这四个问题涉及面很广，我们也作了不少的工作。本文则侧重于讨论将模糊效用函数应用于最优设防水平的决策时，如何能使更为合理的决策准则得以形式化；又如何能有效而合理地分析综合模糊的和非模糊的有关因素。从而就可以建立一个最优抗震设防水平的模糊决策方法。我们认为这个模糊决策方法的基本思想对于结构高层次的设计决策问题都是普遍有效的。

二、决策问题和决策准则

假设在某个具有一定地震活动性的区域要建一个特殊结构物，设已有结构初始设计方案，以下简称为方案G。可供选择的抗震设防水平为 $e_0, e_1, \dots, e_n$ 。其中 e_0 表示不设防， e_n 表示最高设防等级。结构物预期使用年限为T。我们所面临的决策问题是要综合考虑方案G目前的抗震投资效益和T年内的抗震效益，选择合理的设防水平。

这里就有一个以什么样的原则去综合眼前利益和长远利益从而优选设防水平的问题。综合现行的设防原则，我们提出这样的决策准则：考虑方案G在各级设防水平下而发生各种可能震害时的经济和社会两方面的综合效用，并依据场地所在区域的地震活动性把各情况下的效用结合起来，进而决策最优设防水平。由这个准则进行决策，必然要涉及许多模糊因素，而且效用的概念本身就是属于模糊范畴的问题。因此，我们把模糊效用函数应用于最优设防水平的决策是合理的，也是很有效的。这表现在应用模糊效用的概念和求模糊效用函数的方法能有效的综合眼前利益和长远利益，模糊因素和非模糊因素。

我们选取方案G可能发生的地震破坏为6个等级：无破坏N、轻微破坏L、中等破坏M、严重破坏H、全部破坏T、倒塌C。于是可用表1列出决策分析中所需要的各种信息。表中的 P_0^T 和 $\underline{U}_0^T$ ($\tau \in R$, R表示各级设防水平的角标集合) 分别表示方案G在 τ 级设防水平下, 在T年内不发生地震破坏的概率和模糊效用值; P_k^T 和 $\underline{U}_k^T$ ($k = 1, 2, 3, 4, 5; \tau \in R$) 分别表示方案G采用 τ 级设防水平时, 在T年内发生一次k级震害的概率和模糊效用值; P_{ij}^T 和 $\underline{U}_{ij}^T$ ($i, j = 1, 2, 3, 4, 5; \tau \in R$) 分别表示方案G采用 τ 级设防水平时, 在T年内发生i级和j级震害各一次的概率和模糊效用值。

表 1

e	T年内, 方案G发生各种地震破坏的状态							
	N	只发生一次地震破坏					发生两次地震破坏	...
		L	M	H	T	C		
e_0	$P_0^0, \underline{U}_0^0$	$P_1^0, \underline{U}_1^0$	$P_2^0, \underline{U}_2^0$	$P_3^0, \underline{U}_3^0$	$P_4^0, \underline{U}_4^0$	$P_5^0, \underline{U}_5^0$	$P_{ij}^0, \underline{U}_{ij}^0$	...
e_1	$P_0^1, \underline{U}_0^1$	$P_1^1, \underline{U}_1^1$	$P_2^1, \underline{U}_2^1$	$P_3^1, \underline{U}_3^1$	$P_4^1, \underline{U}_4^1$	$P_5^1, \underline{U}_5^1$	$P_{ij}^1, \underline{U}_{ij}^1$	...
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
e_τ	$P_0^\tau, \underline{U}_0^\tau$	$P_1^\tau, \underline{U}_1^\tau$	$P_2^\tau, \underline{U}_2^\tau$	$P_3^\tau, \underline{U}_3^\tau$	$P_4^\tau, \underline{U}_4^\tau$	$P_5^\tau, \underline{U}_5^\tau$	$P_{ij}^\tau, \underline{U}_{ij}^\tau$	...
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
e_n	$P_0^n, \underline{U}_0^n$	$P_1^n, \underline{U}_1^n$	$P_2^n, \underline{U}_2^n$	$P_3^n, \underline{U}_3^n$	$P_4^n, \underline{U}_4^n$	$P_5^n, \underline{U}_5^n$	$P_{ij}^n, \underline{U}_{ij}^n$	...
							($i, j=1, 2, 3, 4, 5$)	

三、方案震害危险性分析

方案震害危险性分析的目的在于求表1中的各概率值。分析过程可分为两步。第一步是场地地震动危险性分析，即求场地在T年内发生各种强烈程度的地震动的概率 $P(I)$ ，I是地震烈度值。分析计算方法可参考文献〔2〕。第二步是方案震害分析。我们在文献〔3〕中提出了一种分析结构初始设计方案震害的模糊数学方法，可以求得具有各级设防水平的方案G在各种地震烈度I的作用下，发生各种震害的隶属度 $\mu_d(e_r, I)$ ，其中 $d \in D$ （D是表示各种震害状态的角标集合）。于是可以求得表1中的各概率值为

$$P_k^T = \sum_I \mu_k(e_r, I) P(I) \quad (1)$$

$$P_{ij}^T = \sum_I \sum_J \mu_i(e_r, I) \mu_j(e_r, J) P(I, J) \quad (2)$$

式中的 $P(I, J)$ 是场地在T年内发生地震烈度为I和J各一次的联合概率。

四、模糊效用分析

关于模糊效用的概念和模糊效用函数的分析计算，我们在文献〔1〕中已经作了详细的讨论。本节将应用文献〔1〕中提出的基本思想和方法去求表1中的 U_d^T （ $r \in R, d \in D$ ）。

根据具体问题的特点选择模糊效用值的论域为某实数区间 $[a, b]$ 。把模糊效用值定义为该区间上的7个模糊子集 $U_1, U_2, \dots, U_7$ ，它们分别表示效用值非常小、小、较小、中等、较大、大、非常大。其隶属函数

由图 1 和式(3)所示。显然它们都是有界闭模糊数。

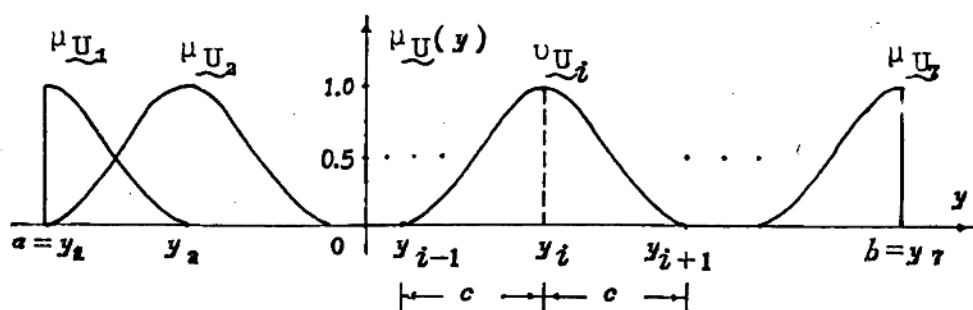


图 1

$$\left. \begin{aligned} \mu_{\underline{U}_1}(y) &= \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\sin\left(\frac{y-a}{c} + \frac{1}{2}\right) \pi + 1 \right) & (a \leq y < y_2) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ \mu_{\underline{U}_i}(y) &= \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\sin\left(\frac{y-y_{i-1}}{c} + \frac{1}{2}\right) \pi + 1 \right) & (y_{i-1} \leq y < y_{i+1}) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ \mu_{\underline{U}_7}(y) &= \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\sin\left(\frac{y-b}{c} + \frac{1}{2}\right) \pi + 1 \right) & (y_6 \leq y \leq b) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

($i=2, 3, 4, 5, 6$)

式中 $c = \frac{1}{6} (b-a)$

$y_i = a + (i-1)c \quad (i=1, 2, \dots, 7)$

当方案 G 采用 r 级设防水平而发生 d 级震害时，我们称之为情况 Q_{rd} ($r \in R, d \in D$)。反映各种情况下的社会效益和经济效益的指标被称为评价因素。一般情况下可取评价因素的集合为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_s\}$ ，本文我们建议取各评价因素为：抗震设防初投资 x_1 ，震害经济损失 x_2 ，

人员伤亡 x_3 ，次生灾害 x_4 ，社会影响 x_5 。由各种统计资料和专家经验可以进行方案 G 的抗震初投资分析和进一步的震害估计，从而可以确定各评价因素在各种情况 $Q_{\tau d}$ 下的具体取值 $x_d^{\tau} = \{x_{1d}^{\tau}, x_{2d}^{\tau}, \dots, x_{5d}^{\tau}\}$ ($\tau \in R, d \in D$)。由文献〔1〕中提出的求模糊效用函数的方法，即可求得表 1 中各模糊效用值：

$$\underline{u}_d^{\tau} = \{u_1/\underline{u}_1, u_2/\underline{u}_2, \dots, u_7/\underline{u}_7\} \quad (\tau \in R, d \in D)$$

$\underline{u}_d^{\tau}$ 是二级模糊集。如果以 $u_1, u_2, \dots, u_7$ 为权，则可用加权平均的方法化 $\underline{u}_d^{\tau}$ 为定义在 $[a, b]$ 上的普通模糊集：

$$\bar{u}_d^{\tau} = \frac{1}{\sum_{i=1}^7 u_i} \sum_{i=1}^7 u_i \underline{u}_i \quad (4)$$

这是一个关于模糊数的数乘与求和的运算，具体算法可参考文献〔4〕。

五、模糊决策

由第二节提出的决策准则和第三、四节的分析结果。我们先计算方案 G 在各级设防水平下的期望模糊效用值：

$$E_{\tau} = \sum_{k=0}^5 P_k^{\tau} \bar{u}_k^{\tau} + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 P_{ij}^{\tau} \bar{u}_{ij}^{\tau} + \dots \quad (\tau \in R) \quad (5)$$

然后选择由

$$E_l = \max \{E_{\tau} \mid \tau \in R\} \quad (6)$$

所对应的第 l 级设防水平为方案 G 的最优抗震设防水平。

在地震活动性较小的区域，取式(5)中的第一项求和式就有足够的精度去进行决策分析，即使是在地震活动性较大的区域也只取前两项求和式即可。由于 E_{τ} ($\tau \in R$) 是模糊数，一般情况下不易直接比较它们的大小。

我们建议比较它们的一阶矩:

$$y_{\tau} = \frac{\int_a^b y \mu_{\underline{E}_{\tau}}(y) dy}{\int_a^b \mu_{\underline{E}_{\tau}}(y) dy} \quad (\tau \in R) \quad (7)$$

以决定大小顺序。于是, 若有 $y_q \leq y_t$ 时, 则有 $\underline{E}_q \leq \underline{E}_t$ ($q, t \in R$)。

六、算 例

设有一方案 G , 预期使用年限为 50 年, 可选抗震设防水平为 4 个等级的地震烈度: VII、VIII、IX、X。假设由方案震害危险性分析和模糊效用分析求得了如表 2 所示的结果。选取效用的论域为区间 $[0, 60]$ 。只取式 (5) 中的第一项求和式计算各烈度的期望模糊效用值, 所得结果如图 2 所示。显然有 $\underline{E}_8 > \underline{E}_9 > \underline{E}_7 > \underline{E}_{10}$, 于是可选 VIII 度为方案 G 的最优设计烈度。

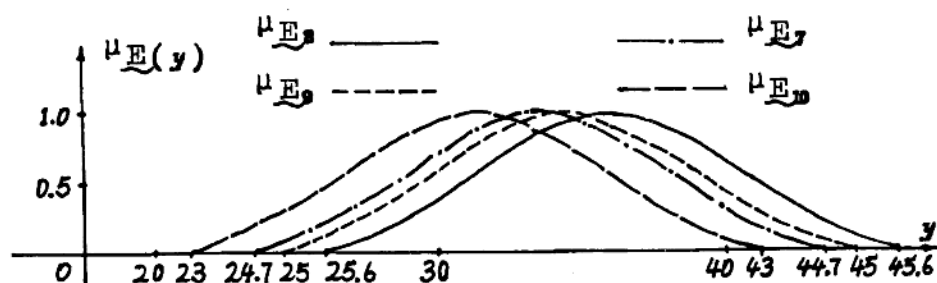


图 2