

建抗 80-28

工程抗震译文

1980

No 5

美国地震工程代表团
访华报告集

中国建筑科学研究院
工程抗震研究所

建抗 80-28

工程抗震译文

1980

NQ 5

美国地震工程代表团
访华报告集

中国建筑科学研究院
工程抗震研究所

一、美国地震工程的发展和研究

J. Blume博士曾提出有名的吸能原理和二程烈度表，并与Newmark教授首次提出延性设计的概念。他就美国地震工程发展史、从地震中吸取的经验教训以及地震工程研究课题和趋势作了简要的报告。

1. 美国地震工程发展简史

在1906年以前，虽然遭受过许多地震，但未考虑抗震措施，只不过把倒塌的房子重建而已。1906年旧金山大地震时，火灾造成的损失比地震本身还大，引起了人们的重视。日本有许多科学家都到旧金山现场研究震害，佐野利四先生回国后提出了制定抗震规定的建议，并建造了一些考虑抗震的房屋，这些房屋在1923年关东大地震中没有倒塌，说明抗震规定是很重要的。

1925年发生了Santa Barbara地震，许多房屋倒塌，在1933年长滩大地震中，中小学校舍破坏很多，于是提出学校建筑应考虑抗震，基底剪力取重力的8%。同时，政府开始资助抗震研究，我参加了两年的研究计划，首次考虑振台进行抗震试验的问题。并且注意研究地面运动、共同作用、振型问题，开始讨论底层柔软结构的优缺点。不过这些研究一直停留在静力分析的范畴。

1940年，El-Centro地震取得了完全详细的地震

记录（在此之前仅有很少的一些地震记录），随后开始了反应谱的研究。Biot通过扭摆仪进行了研究，我也参加了这项研究。

1952~1953年，发表了重要的抗震文献（ASCE第66号报告），提出了拟动力分析和依据周期计算基底剪力的方法。当时采用的基底剪力跟风荷载下的基底剪力相当，现在看来是不够的。这项文献的编写前后花了两年时间，有许多工程师参加了工作，并由此建立了加州土木工程学会。

此后开始制定统一建筑规范，并每隔三年由加州修改一次。1949年成立了EERI——地震工程研究协会，至今有近30个国家7000多了成员。我们很欢迎你们参加这个协会。

1958年我曾提出按吸能标准进行设计的想法，并在2th WCEE会议上介绍过。61年我和Newmark先生合写了一本书，提出了钢筋混凝土结构延性设计的概念。可惜，许多钢结构工程师不同意，引起了一场辩论，直到许多年后（大约在1970~1973）这个概念才被采纳到规范中。

由于许多工程未能用延性概念进行设计，在1971年圣弗南多地震时Olive View医院破坏，帝国县也有一座建筑破坏，引起人们的注意。有人认为这是规范没有用处的证明，其实是这两座房屋延性不够，它只说明设计方法要改进，要采用延性设计。在美国，规范往往比当时的技术水平落后10~15年。

60年代开始建造原子能发电站，对结构要求更高、更保守，也提出了许多需要研究的问题。同时，电子计算技术的发展和应用也促进了地震工程的发展。

近10~15年来地震工程的研究加强了，我们也进行了地震危险度分析和概率分析，这是很必要的。虽然现在的设计

可以使结构的强度要多高就有多高，但这不是一般情况下容易实现的。设计时要进行许多分析，使结构不仅有抗震性能，而且能满足使用上述要求的其他性能。

2. 从历次地震中吸取经验和教训

J. Blume博士认为地震工程研究应善于从地震中学习，介绍了从世界许多地震中吸取的经验和教训。简要归纳起来有：

(1) 1906年8.3级旧金山地震中，木结构房屋仅在基础破坏时才损坏；离断层3英里的金门大桥没有损坏，桥下的砖石砌筑也仅有小裂缝，说明加强抗震设计是可能的。从几次地震破坏的设计看，按规范屈服强度0.2W设计的房屋，只有0.2~0.3遭到破坏，而未设防的破坏在0.4以上。

(2) 土壤的破坏会造成结构的损坏，要避免在危险地带建造房屋。地震的危险地带包括：斜坡、滑坡、泥陷或隆起、液化、半挖半填场地、杂填冲击土和断层等。当不可避免时要用各种方法把危险减少到可接受的程度，如排水、夯实、打桩、地下连续墙、化学处理、振动处理和挡土墙等。新潟地震时，许多现代化程度很高的房屋因液化而倒塌，而有地下室的房屋表现了较好的抗震性能。

(3) 关于地面运动峰值加速度和震中距的关系，从El Centro地震的统计数据看，离散性较大，有40%大于平均值（理论上讲应有50%大于平均值），取 $\alpha = 1.4$ 则仅有10%超过。1978年希腊地震时，虽然震级较小，峰值仅0.13g，但远离震中的房屋也受到破坏。

(4) 使用规范时，要注意规定的内容和适用范围。

1967年加拉加斯地震时，新闻界报道有上千幢按UBC规范建造的高宽比为 $4\frac{1}{2}$ 的房屋倒塌了。其实这些房屋是按ATC

东部标准建造的，未做抗震设防。

(5) 不同的平立面、不同的建筑布置对抗震性能的影响有利弊之分。对平、立面中形状突变的部位要做特殊分析和加强。日本仙台地震时，主体结构未破坏而预制的外墙板掉落，砸坏了地面的小汽车。建筑设计也要考虑抗震。

(6) 即使完全对称的结构，楼层在地震时运动的轨迹也是不对称的，这说明地震作用的复杂性。对筒型建筑尤应注意这一点。

(7) 柱子的设计要特别注意。要考虑延性设计，要有足够的抗剪承载力。1971年圣邦南多地震中，Olive View医院底层柱子压屈，帝国县服务楼边柱破坏。这些底层较柔软空旷的房屋破坏很大，而有些砖结构仅开裂。

(8) 要注意细部构造设计与施工。女儿墙和建筑装饰要能够承受全部水平力；预制的、先张预应力或后张预应力的构件要特别注意联结构造；砌体结构要加筋；水平楼面板和屋面板要注意自身平面内的刚度；要注意联结构造，如墙和楼板、节点、拱脚支柱等。日本仙台地震时，由于采用高碳钢造成油罐上部压屈、喷油；有丁土罐基底的抗剪销链未浇灌混凝土造成破坏；某锅炉因管道接头没有处理好被地震破坏造成停电一个月。因此，对细部构造的影响是不可忽视的。

(9) 对 $P-\Delta$ 效应应予以研究，尤其是高层建筑，弯曲变形为主的建筑和有柔性层的建筑。这些建筑的第一周期较长，在非弹性范围内将导致双向的偏移，柱子受到严重的 $P-\Delta$ 作用和其他作用的积累性影响。

(10) 现有建筑的抗震加固是一个复杂的问题。只要结构未达到现行规范的标准，则增加其抗震能力是可能的。加固时要依据原有结构的特点，对构件的加固要依据总体分析进行。

这样加固比新设计更复杂。

3. 提高抗震设计水平的一些建议

(1) 工程烈度表。J. Blume博士对麦氏烈度做了修正，提出工程抗震设计所依据的以谱速度表示的工程烈度表。这了工程烈度随着结构刚度（周期）的不同而变，还要考虑不同结构反应下降趋势的不同。例如：基本烈度为6度的地区，对不同结构类型的烈度要加以调整，一般的低刚度结构取5，一般的大刚度结构取7，而桥梁之类的长周期结构取6；进一步考虑不同结构反应谱下降的趋势，每一类还可以再分得更细一些。图中X是未知的，由趋势判断。

X	5	6	7	7	7	7	6	X
	5		7				6	
			6					

图 1-1

(2) 由于刚性结构在侧力作用往往突然破坏，要采用延性设计，应研究怎样使框架和墙都有很好的延性。

(3) 对带有填充墙的框架，不主张采用将弹性力除以延性系数作为非弹性力进行设计的方法。因为地震时，填充框架进入非弹性状态不是理想弹塑性状态，简单的折减使设计失去正确的概念。

(4) 在框架结构中，水平构件的刚度和竖向构件的刚度比 ρ 不宜太小，否则开裂后刚度太小影响动力性能。例如第二振型和第一振型周期之比， ρ 大时 $T_2/T_1 \approx 3$ ， ρ 小时 $T_2/T_1 \approx 6$ ；从柱中弯矩分布看， $\rho=1$ 柱中点有反弯点， $\rho=0.01$ 时柱中没有反弯点。一般设计人员往往采用低的 ρ

值，而仍然假定柱中有反弯点，这是有问题的。尽管弹性阶段通过计算机分析可以作些调查，但结构进入非弹性时可能造成破坏。

(5) 工程设计地面运动参数，最好采用谱加速度值，从地面运动峰值加速度和谱加速度的关系来看，当加速度记录值减少30%时谱的峰值仅减少5%。目前的设计太重视峰值加速度和震级。实际上8级地震地面的振幅可能跟6、7级地震的振幅相差不多，只是破坏范围大了，作用时间长了。

(6) 从有效加速度和仪四测得的加速度相比来看，目前的设计是偏于保守的。结构实际的屈服强度和规范规定的强度也是不同的。这个加速度的比值，对于脆性结构是较高的，对于延性结构是较低的，有必要提高设计水平。

4. 今后研究方向

J. Blume博士认为，今后地震工程要研究的问题有：

(1) 地震破坏观测、试验和理论分析要统一起来，要成为一了便于设计人员使用的成果。不仅观察被破坏的建筑物而且观察未破坏的建筑物，不仅收集破坏的程度而且收集土壤和结构设计资料；要有可靠的包括多了方向的地面运动记录；理论分析的假片要经过试验验证。

(2) 要设计出更合理更经济的结构，不同类型的结构要考虑不同的安全度要求。规范的研究要做到合理性（在美国还要有法律依据）；要能够预计结构的破坏而不是震后补计；要像设计原子能发电站那样把最新的工艺和技术都用到人们日常聚居的建筑物上去。

(3) 要进一步研究断层的力学性质，如断裂力矩、动应力下降、断层尺度、断层滑动、断层上升等，要抓住实质向

题。对基岩地形的影响也要研究，因为它影响到上部结构的安全。

(4) 要研究竖向地面运动。目前的试验把仪器置于混凝土板或地面上，这样得到的数据能否代表作用于结构的竖向运动是值得怀疑的，因为试验底盘是自由的，与有结构时不同。当然，也不能认为只有实际地震的考验才是真正的试验，因为单丁地震是互不相同的。

(5) 在复杂的情况下有几十个因素时，若只取一、两种最危险的状态进行设计就太保守了。不能简单地把一种情况下的安全系数加上另一种情况下的安全系数，要把各种情况下的安全系数加以平均，求出方差和变异系数，再按概率统计方法得到安全度的保证率。

(6) 房屋的设计要把结构设计和建筑造型、布置等配合起来。抗震要求应力传递愈简单愈好，造型也是这样。结构在地震下的能暑、做功是很重要的，过去日本人把地震作为一个水平力来考虑，在设计上是方便的，但那还是一种低水平的设计，现在要进行考虑能暑和做功的设计研究。实际地震作用下结构的工作状态只能是一个，因此需要各个学科的学者互相配合，共同研究。

J. Blume博士在报告中还谈到，中国对海城地震的预报引起了国际上的兴趣，不过许多人以为中国只做地震预测，这一次到中国来，看到你们在其他方面也做了许多工作，海城、唐山两次大地震唤醒了你们的地震工作，这是我们很同意的。他还指出，你们已经开始能暑方面的研究，这是很高兴的。

二、强震和脉动观测仪

K. L. Benuska 先生介绍了美国强震加速度仪的构造、特性、发展和安装使用情况，并介绍了重力坝和海洋结构脉动测试的一些情况。

1. 强震加速度仪的构造和性能

加速度仪一般由触发回、三了加速度传感回、光源、记录设备等组成。美国地质调查局 (USGS) 在 1932 年开始使用照相纸式加速度仪，直到 1963 年才有第一台商业加速度仪 AR 240 出现，此后相继有 RET 250 (1967)、MO 2 (1968)、SMA-1 (1969) 等。它们的量程一般为 $\pm 1g$ ，频率范围 $0.15 \sim 25 \text{ Hz}$ ，区别主要是记录部份，例如 SMA-1 使用的是 70 mm 的胶片记录。

在 1969 年以前，强震仪的自动触发装置是水平触发回，所以 1940 El-Centro、1949 Olimpia 地震记录先记到的是剪切波，丢失了更早的 P 波。从 1969 年使用垂直触发回以来，发现不论离震中远近，最初的 P 波有很强的垂直分量，而水平分量则在其后到达。在距断层 40 公里处大约相差 4 秒，在靠近震源的地方大约相差 1.5 秒。

磁带式加速度仪在 70 年代问世，采用模拟调制频记录 (FM)，可以快速回放。仪回噪声约为量程的 $1/200$ ，即 $\pm 0.005g$ 。数字式加速度仪有更低的噪声，利用 12 位的模数转换回，噪声只有 $1/2048$ 。传统的照相纸式加速度仪

数字化后的噪声约为 $1/1000$ 。

近来，美国的建筑物、核电站和大坝已广泛应用中心记录站，近海结构和桥梁上的应用也不断增加。它利用7吋宽的胶卷记录，3丁地震计的信号。其触发器安装在另一丁地方，包括备用共有三丁。

2. 强震仪安装使用情况

(1) 自由场的强震仪，不论地面还是地下均用隐蔽方式，地面有罩盒、地下有封闭箱，以防止周围影响（加州多在变电站设置强震仪）。罩盒上附有供电的太阳能电池和无线电接收天线。

(2) 海上平台用水下加速度仪。仪口放在不锈钢的管中，通过防水电缆连接到平台上。

(3) 建筑物要在地下室、地面层和有意义的楼层上设置。由电又安装电缆，再由仪口专线安装强震仪。记录口安装在便于维修的位置。

(4) 重力坝，它是二维结构，要设置“参考基准点”，以便把各测点的结果进行比较。

3. 脉动测量

工程结构往往利用脉动测量决定结构的振动特性（周期和振型阻尼）。脉动测量的主要问题是取多少数据和记录时间的长短。

脉动测量仪口要适于野外工作，能够抑制结构上不需要的很高的高频振动，往往要有 10^5 的低噪声放大器和积分、微分的传质口，以及进行瞬时相关分析、谱分析的设备。

按照概率统计的要求，在测定临界阻尼比 $\xi_c = \Delta f / 2f_0$

时，频率差 Δf 等于频带宽的 $1/3$ ，记录时间应取 $1/\Delta f$ ，并取几个线段的平均。例如，大坝频率为 8 Hz ，阻尼比 2% ，记录时间一般要 12 分钟；近海结构的频率 1.5 Hz ，阻尼比 2% ，则需记录 $1\sim 1.5$ 小时。

K. L. Benuska 先生还介绍了一个关于 1860 年经受了 1906 年旧金山地震的 60 米高的大坝和墨西哥湾海上平台的脉动实测情况。

三、地震工程研究中的 试验技术

H. Krawinkler 教授介绍了现场和试验室振动试验技术，主要是如何实现并控制振动的课题。

1. 现场振动试验

(一) 起振机激振：

美国应用最广泛的是离心式水平机械起振机，目前已采用多台起振机同步激振，可以得到两个相近的振型。电液式起振机多用于小型振动台，也可用做起振机，其优点是可以产生白噪声振动。采用闭环伺服控制的液压式起振机，则可以产生破坏性的激振力（ 13500 Kg ）。

(2) 地下爆炸法。包括非限制性爆炸和限制性爆炸两种。对非限制性爆炸，简单地把炸药成排埋入土内，依次逐了爆炸来近似模拟地震波。由于反应谱在 2 Hz 以下与实际地震的反应谱不同，爆炸波的频率高、相应加速度大，需要研究怎样降低爆炸的频率和加速度。

限制性爆炸是将炸药置于铁管内，两头有橡皮塞，可以产生较大的压力，频率和加速度都低些。铁管还可重复使用。

(3) 现场试验不可缺少的仪器有：示波器，计算机、快速富氏分析仪和打印机。为了进行振型和周期的分析，至少要用两个拾振器，通过富氏变换和自相关、互相关谱密度函数分析得到。因此要多次（如 50 次）测量避免随机误差。

2. 试验室试验

试验室可以进行模型的动力分析和静力分析。

(1) 模拟地震振动台，有机械式、电磁式和伺服液压式三种。电磁式的激振力小、频率不能很低。对较大的构件要用液压驱动，按位移控制。

振动台的大小与造价有直接的关系，例如 1.5 米见方的振动台要 10 万美元；6 米见方的要 100 万美元；而 15 米见方的要 1 亿美元。

除了大振动台外，往往只能进行减少尺度的模型试验。这就有动力相似的问题。动力相似律可以根据量纲分析导出，它要求时间、位移、速度、加速度等的比例都要满足相似律的要求，然而振动台动力特性曲线在不同阶段的控制是不相同的（低频段、中频段和高频段分别由位移、速度和加速度控制）。对于模型试验，振动台加振器出力的保守的估计值是：

$$F_{dyn} = w_t a_r a_{max} / g + V_p F_r$$

w_t — 振动台重量；

a_r — 模型加速度比例；

a_{max} — 原型的最大加速度；

V_p — 原型的最大基底剪力；

F_r — 模型的剪力比例。

因此，如果计划不周，所购置的振动台就可能没有什么用。采用小尺寸的模型来代替原型进行试验，对地震工程研究是一个较新的研究领域，只有满足相似律的情况下才能替代，此时试验是台标的。H. Krawinkler 教授介绍了一个三层钢框架的振动台试验，模型和原型的滞回曲线是十分相似的。

(2) 加振台试验和的静力试验。前者的优点是直接得到变形反应，加载速度对变形影响不大（从 0.25 Hz、2 Hz 和 10 Hz 的滞回曲线看是相近的，静力试验下强度稍低一些，偏于保守）；后者任何时候都可以停下来观察或检查仪台，但试验结果与加载历史有关，试验的可靠性是可怀疑的。为此，要采用计算机——加力台联机（on-line）试验解决。要用伺服式加力台通过计算机控制，多功能的小型计算机可以产生输入信号，控制加力台，采集试验数据，并进行数据处理再输出试验分析结果。

目前，美国对三向动力试验很重视，用来研究三个方向作用的相互影响。这需要更多的设备，试验的规模也更大。至今还仅有一个这样的大型设备。

四、地震危险度、

地面运动和设计地震力

N. C. Donovan 先生介绍了 ATC-3 所涉及的地震危险度、地面运动和设计地震力，强调指出：根据场地的地震危险性导出的地面运动值、仪站观测的地面运动峰值和用于设计规范等效侧力的地面运动值三者是不同的概念。

1. 关于地震危险度：

地震危险度是根据极值原理进行分析的，它最早在新西兰和加拿大发表，并据此绘出了加拿大地震预测图。估计地震危险度时需考虑：

(1) 发震断层地理位置和形状，可按麻省理工学院 Cornell 教授的方法估计，此时，地震活动率是一个很关键的参数，但还未与震级直接联系起来。

(2) 要考虑衰减的不确定性。Blume 先生提到的均方差就是一种考虑方法。根据实测数据在统计的对数均方差约为 0.707，然而如果首先把现场的情况加以分析，排除明显的问题，则这种方差要小些，例如圣弗南多地震的不确定系数为 0.48，按观测站土层类型分别处理，则此系数只有 0.4。

(3) 要考虑断层的断裂效应，除了震中方位影响外，要考虑距断层的垂直距离，在这距离内若无其他断层则完全符

台衰减规律。

(4) 对历史上的记录进行分析整理时，首先要确定当时仪器的性能，据此校正数据再做危险度分析。

2. 关于实测数据的整理

(1) 采用对数坐标进行整理有时并不能使数据紧凑，尤其对近场地震；数值较小时用对数坐标反而拉开了。

(2) 从圣弗南多地震的等震线看，若根据等震级所围面积折标为等圆并按其半径来衡量衰减性，则实际曲线与理论曲线可能相差1级。

(3) 关于加速度和地震强度的关系，通常认为烈度大1倍，加速度大1倍。而实际上是依据较小的烈度值导出的；而且在美国东部，这种变化似乎比西部平缓一些。看来在这方面还需要进一步研究。

(4) 随着记录数据的增多，记录到的峰值加速度日益增大，这引起了人们的注意。然而，数据的增多使统计平均值的可靠性加大了却没有引起人们的足够重视。只有在可靠的平均值的基礎上才能为设计提供必须的可靠数据。

3. 关于ATC-3的设计谱

为了把设计系数和地面运动数值区分开，ATC-3采用了有效峰值加速度 EPA 和有效峰值速度 EPV 。 EPA 正比于周期0.2~0.5秒的加速度谱， EPV 正比于周期1秒的速度谱，比值取2.5。当然这仅用于建筑物，不适用于公路和桥梁。

ATC-3按场地上条件把反应谱划分为3类，可能有人希望划得更细一些；然而编制小组认为不可能再划分得更多了。