

7182

56.259

重要工程中的地震问题

赠阅

胡聿贤 时振梁 主编

地震出版社



重要工程中的地震问题

胡聿贤 时振梁 主编

地震出版社

1987

内 容 提 要

工程抗震设计是重要工程建设和城市建设中的一项基础性工作。近年来发展起来的地震危险性分析和各种地震动参数的研究,已在我国一些重要工程和大城市的抗震设计实践中得到广泛应用。

本文集系统地介绍了地震动研究的国内外现状和在抗震设计中的应用及地震危险性分析方法;具体论述了一些重大工程,如核电站、海洋平台和一般房屋建筑对设计地震动的要求和考虑。

本文集可供从事工程抗震设计人员和科研人员以及有关院校师生参考。

重要工程中的地震问题

胡 聿 贤 主 编
时 振 梁
责任编辑: 马 兰

地 震 出 版 社 出 版

北京复兴路63号

北 京 印 刷 一 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

350×1168 1/32 6 1/4 印张 168 千字

1988年2月第一版 1988年2月第一次印刷

印数 0001—5000

ISBN 7—5028—0078—6/P · 53

定价: 1.85元

前 言

我国在台湾省之东受到菲律宾海板块向西的挤压，在日本之东太平洋板块向西的俯冲也影响到我国，在南面有印度板块向北插入喜马拉雅山之下，因此，东、南沿海地区属地震活动区，历史上曾发生过多处破坏性强震，如1918年的南澳地震和1969年渤海湾地震。为了这些地区建设的顺利进行，必须考虑地震的影响。

地震工程学的发展，特别是工程抗震设计，常常受重要工程抗震要求的推动。由于在经济生产中的重要性及破坏后果的严重性，重要工程应比一般工程建设有更大的安全性；另外，重要工程为数远小于一般工程，故均要求个别进行专门而详细的研究，采用当前最先进的理论和技术，取得一定经验后即推广应用于一般工程的抗震设计，从而推动了地震工程学的发展。显而易见的例子是“小震不坏、大震不倒”的二级抗震设计标准的具体设计措施、在核电站抗震设计中采用的运行标准地震和安全停堆地震概念，已在日本1981年房屋抗震规范中正式采用，我国正在修订中的房屋抗震规范也决定采用。

重要工程中的地震问题主要是如何在经验不足时确保工程的抗震安全，为此，首先要确切地估计工程场地在使用期内可能遭受的地震危险性，再据此进行安全而周密的设计。

地震危险性分析是近一、二十年来发展起来的一个工程地震分支，其目的在于确切地描述工程场地可能遭遇的地震危险，这种描述，要能反映地震活动性和各种不确定性，要能为工程抗震提供科学的依据。

地震危险性分析包括如下七个主要步骤。第一，潜在震源区

带划分。在工程场地的选址阶段，先研究有影响范围内的地震活动性，按其活动性的特性划分为不同的潜在震源区带；第二，各潜在震源区带的地震活动特征。根据历史资料及专家判断，在一定假定下，确定地震活动规律。当前最主要的假定是地震发生的规律符合泊松分布，在时间上是平稳的，在区带内的空间上是均匀分布的。虽然这一假定的可靠性甚差，但常常由于一个区带内的地震资料不足，而在国际上广泛采用。地震活动性规律通常包括：震级频度关系、年平均发生率及最大震级，有时还包括震级与断裂长度的关系；第三，地震动衰减规律。根据本地及外地的历史地震动数据，确定地震动随震源特性（震级、断层类型、震源深度）和传播途径（距离、方位）变化的规律，其中包括地震动设计参数的选择和外地地震动资料的合理利用；第四，场地地震动概率关系。利用前三步的结果，根据震源为点源或断层破裂面源的假定，计算给定场地地震动及其超越概率的关系曲线，即该场地的地震危险性；第五，场地条件影响。当场地不是基岩平缓地形时，在第四步中，一般常先用基岩地震动衰减规律，确定场地基岩地震危险性关系曲线；然后考虑具体场地条件的影响。第六，不确定性修正。根据统计分析先确定各项不确定因素的离散性，如震源区带划分、各区带地震活动性、地震动衰减规律、场地条件等项中的不确定性；然后据此修正所得到的地震危险性关系。按照多大的超越概率设防，则应根据工程的重要性、破坏后果、和经济政治等多种因素来进行决策分析；第七，场地地基稳定性。根据前述各项结果，确定场地可能产生的地基稳定性、如滑坡、地裂、不均匀沉陷、和砂土液化。最后这一项，常常在小区划中考虑。

潜在震源区带划分及其地震活动性是上述后面几步的基础，至关重要，它既是重要工程地震危险性分析的根据，又是地震区划的根据。我国地震工作者深刻了解这一工作，我国有悠久的历史，地震记载多，为研究地震活动中的不平稳性创造了条件。

在地震动设计参数的选择上，在一般房屋抗震设计规范中，由于历史原因，我国一直采用地震烈度作为抗震设防的指标；然后根据国外地震动数据，将烈度换算为地震动加速度作为设计参数。烈度是一个古老的粗略的宏观概念，技术先进的国家大多不用于近代工程抗震设计；对于一般房屋的抗震设计是否应该继续沿用烈度作为指标已有争论；对于重要工程，则大多予以否定。近一、二十年来，抗震设计已进入反应谱理论阶段，并要求考虑反应谱形状随地震大小、距离远近、场地条件而改变，以及结构和土壤的非弹性对地震反应的影响，因而要求同时估计地震动的振幅（加速度或速度）、反应谱、持续时间（简称持时）这三种设计参数，而烈度无法满足这一要求。

由于专业分工的历史原因，国际上存在着一种状况即地震工作者习惯于地震烈度这一简单概念，认为它可以满足工程抗震设计的要求，工作常常止于烈度区划；而设计工程师则从结构安全的要求出发，要求在抗震设计中考虑地震时结构物的动力特性，从而要求考虑地震动反应谱，持时和结构物的自振周期与能量吸收能力；在发展过程中，使地震工作者和工程设计者之间产生了衔接不良的状况。我国也是如此。由于核电站、海洋平台、大型化工设备等重要工程建设在国外建设得较早，一些技术先进的国家已逐步改进了衔接不良的状态，从七十年代起，就重视了地震动及地震危险性分析的应用，如美国的 Algermissen 一直是美国烈度区划图的编制者，就在七十年代初编制了美国地震动加速度危险区划图；加拿大的地震学家按照美国的方式提出了地震动加速度和速度的危险区划图。

有鉴于地震学家与工程师之间在重要工程地震问题上密切配合的重要性，1983年1月在国家地震局地球物理研究所召开了一次学术报告讨论会，邀请国内专家介绍有关地震危险性分析的工作，如核电站、海洋平台及一般房屋对设计地震动的要求和考虑，交流了经验，促进了相互的了解。这次会议的报告是这本报

告集的基础。

由于编者与出版社的努力，终于使本文集得以出版。在这两年中，我国在重要工程及大城市的抗震设计中，对地震危险性分析提出了许多要求，国家地震局正在草拟重要工程地震危险性分析工作大纲，城乡建设与环境保护部正在抓紧大城市的抗震工作和核电站、海洋平台、大型化工设备等重要工程的抗震设计规范。这些可喜的进展使我们地震工作者日益认识到我们的工作对国民经济建设的重要意义，必将进一步促进我国地震工作的发展。这个报告集若能在这方面起一点作用，则与事者幸甚。

在本文集的出版过程中，国家地震局地球物理研究所查志元同志做了许多组稿与编辑工作，在此表示感谢。

胡 聿 贤

1985年

目 录

地震动研究的国内外现状·····	胡聿贤、张敏政 (1)
地面运动参数在抗震设计中的应用·····	周锡元 (39)
核电站建设对地震地运动的要求·····	徐植信 (60)
海洋平台的工程地震要求和设计地震·····	陈 聃 (76)
决策分析方法在抗震工程中的应用 ·····	董伟民、周锡元、鲍霭斌 (88)
地震危险性分析与基本烈度·····	鲍霭斌 (99)
地震危险性分析·····	董伟民 (105)
地震危险性分析中的若干问题·····	时振梁、金 严 (131)
长山地区地震危险性分析·····	章淮鲁 (145)
运用冈贝尔极值的Ⅲ型分布对长山地区未来五十 年地震强度的分析·····	章淮鲁 (162)
地震危险性分析中的地震学问题 ·····	国家地震局地球物理研究所二室 (170)

地震动研究的国内外现状

胡聿贤 张敏政

(国家地震局工程力学研究所)

从地震工程观点看,地震动是引起震害的外因,是抗震设计者防御的对象,抗震工作者始终关心这一领域中的进展;设计水平还在一定程度上与这一领域中的进展有着密切关系。因此,在全面讨论地震工程问题时,总结一下这一领域的新情况是很有意义的。

一、抗震设计理论与地震动研究的发展

抗震成为一门工程科学是本世纪二十年代左右的事,至今约有六十年的历史了。在此期间,抗震设计理论可以说经历了静力理论和反应谱理论两个阶段,并正在向第三个阶段动力理论过渡,与之相应,地震动研究工作的进展大体上也分为三个阶段,即烈度、反应谱以及谱与持时的阶段。下面分别叙述这三个阶段的特点。

(一) 静力阶段

地震动研究中的烈度阶段开始得很早,远早于抗震成为工程学之前。在一、两百年前,尚无地震仪器来测量地震动的大小,人们只能利用宏观方法描述地震动,从而出现了烈度这个概念。在抗震成为工程学之后,设计者要求一定的地震动工程指标,最简单的就是静力设计阶段中采用的惯性力 $F = ma = KW$ 中的加速度。因此,人们一直在寻求烈度与加速度的对应关系,这种努力现在还有人在进行。

(二) 反应谱阶段

大约在五十年代, 抗震设计者普遍接受了反应谱的概念, 认为反应谱可以更好地描述地震动的工程特性, 并据之进行设计。设计时, 用下式表示结构的基底剪力 $Q_0 = W(K\beta) = KW \cdot \beta$ 。与静力阶段相比, 差别只在于反应谱 $\beta(T, \xi)$, 它是周期 T 和阻尼比 ξ 的函数。

这时, 有人放弃了烈度这个概念而直接从地震动估计加速度反应谱 β 与 K 或乘积 $K\beta$ (如美、日); 有的人则仍然保留烈度概念, 并认为它只与 $K = a/g$ 中的加速度 a 有关, 而反应谱 β 只是一种放大系数 (如苏联)^[42]。

在此阶段, 多数人承认场地土 (包括土性与厚度) 对反应谱形状的影响, 我国也早在1964年就在抗震规范草案中放弃了按场地土调整烈度的场地烈度这个概念, 而代之以反应谱与抗震措施的调整; 到七十年代, 很多国家的抗震规范作了类似的规定, 如美国、日本、土耳其等^[42]。

(三) 动力阶段

大约在七十年代以后, 由于强震加速度记录的大量积累以及核电站、海洋平台和地下结构等重要工程任务的需要, 抗震设计理论可以说开始走向新的动力阶段。虽然这一阶段尚未全面实现, 但已表现出以下几个特点: (1) 加速度最大值并不是表示地震动特征的唯一有意义的参数。一般认为, 地震动的全面描述还要考虑反应谱 $R(T, \xi)$, 而且必须涉及强震持续时间 T_a ; (2) 为了进行动力分析并使其有适当的代表性, 要求制造或选择满足给定反应谱与持时的多个加速度过程 $a(t)$ 作为结构的地震动输入; (3) 在抗震规范中开始出现考虑震级 M 与距离 Δ 而规定不同反应谱的事例; (4) 出现了一种建议, 用震矩震级 M_w 代替震级, 并同时采用地震断裂面上的应力降作为震源第二参数, 以更好地考虑近场地震动。这一建议已为不少人所接受, 并有可能同时考虑断层类型^[4, 41]; (5) 如何更好地将美国西部的大量地震动数据用于缺乏

这种数据的美国中部与东部，成为近十年研究的重点，并提出了一些有益的建议；（5）设计地震动的规定必须与地震动出现概率和结构破坏概率相联系。

本文将着重评述第三阶段的新进展和存在的问题，仅偶然涉及前两阶段的成果。

二、地震动主要参数与双重破坏准则

选用哪些地震动参数作为设计指标是一个老问题。早在五十年代人们就已经认识到设计指标至少应考虑振幅、频谱和持时三个要素。但是，在过去二、三十年内，由于数据不足，抗震理论进展不大，也没有一个大家公认的方法能够在设计中明确考虑持时的影响、震级和距离对频谱形状的影响，因而工作的重点仅在如何确定加速度或速度的峰值、有效值或概率上。只是在最近几年，才出现了解决持时对结构反应影响问题的希望。下面先介绍三要素研究的新成果，然后着重从双重破坏准则来评述有关持时影响的进展。

（一）地震动幅值

自有烈度概念以来，人们就在努力寻求一个简单的物理指标来表示地震动强度或破坏势，已考虑过的物理量至少有下列十几种：

加速度峰值 a_p

速度峰值 v_p

谱强度 $S I_{\xi} = \int_{0.1}^{2.5} R_v(I \cdot \xi) dT$ ， ξ 为阻尼比， R_v 为相对

速度反应谱。

Arias强度 $I_1 = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} a^2(t) dt$ ， $a(t)$ 为加速度时程。

均方根加速度 $a_{rms} = \left[\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} a^2(t) dt \right]^{1/2}$ ，其数值与窗宽 T_0 有

关, T_0 的选择有任意性。为求 a_{rms} 的瞬时值, T_0 常选为 1 秒; 为取得某种平均值, T_0 取为 T_d 。一般均认为 a_{rms} 比 a_p 更稳定^[13, 24, 38], 但它的离散性也很大^[21]。

有效峰加速度 $EPA = R_a / 2.5^{.6}$ 。

R_a 为相对加速度反应谱。

有效峰速度 $EPV = R_v / 2.5^{.6}$ 。

有效反应谱加速度 $a_e^{[28]}$, 将加速度最大局部峰尖削去并不影响谱强度, 从而得到降低了的加速度最大值。

持续加速度 a_s 或持续速度 v_s , 一个地震动过程中的第三、第四或第五个最大峰值^[27]。 a_s/a_p 平均为 0.6—0.7, 变化范围在 0.2—0.9 之间; v_s/v_p 亦同。

概率有效峰值^[24], 在一次过程中超过概率为 10%—15% 的峰值;

静力等效峰值, 按简单物体倾倒或滑动反推而得到的地震动幅值。

等效简谐振动峰值, 在六十年代中 Seed 等将复杂振动过程 $a(t)$ 等效为简谐振动, 其幅值常取为 $0.65 a_p$ 。

上述这些地震动幅值可以分为两大类, 谱强度等具有总能量或总强度概念; 峰值则仅反映最强烈的一个局部。

Housner 和 Jennings^[15]最近根据 13 个特性不同的典型地震动加速度记录, 对比了不同的地震动破坏势, 其中包括 a_p 、 $SI_{0.2}$ 和 a_{rms} 。结果明确指出, 在不同的破坏势指标上, 这些地震动“强烈程度”的排序顺序有很大差异。此为采用简单地震动强度概念所常见。故若只用一个指标来代表一次地震动的强度, 如现在常用的 EPA 或 a_p , 就会在设计中导致过大的不一致性。可见现有的一些规范或标准是过分简化了^[15]。

(二) 频谱

近十年来有关地震动频谱研究的进展主要可以概括为以下三方面:

(1) 反应谱与功率谱之间的关系

人们早已知道, 功率谱 $G(\omega)$ 与傅里叶谱 $F(\omega)$ 的关系为:

$$G(\omega) = \frac{1}{T_d} E[F^2(\omega)] \quad (\text{其中 } E \text{ 为期望}); \text{ 反应谱 } R(\omega) \text{ 与功}$$

率谱的关系现在也有了结果。这两个谱中, 从随机理论看, 应该用功率谱, 从工程观点看, 已习惯于反应谱。现在取得的进展是 Vanmarcke^[37] 首先提出的。设 $R_v(\omega)$ 为相对速度反应谱, σ_v 为相对速度反应均方差, 从随机理论可知, $R_v(\omega) = r \cdot \sigma_v$, 式中 r 为峰值因子, 主要与反映 V 的最大值不超过 $R_v(\omega)$ 的概率 P 有关, 同时还与持时 T_d 阻尼和谱形有关。 r 的中值 ($P=0.5$), 在大阻尼时可以近似取其上限 $r = \sqrt{2 \ln(2n)}$, 在小阻尼时取其下限 $r = 1 + 0.25 \ln n$, 其中 $n = 1.4 \omega_0 \cdot T_d / 2\pi$, ω_0 为体系自振频率。在根据随机振动理论求得反应均方差 σ_v 之后, 即可从上式求得反应谱为:

$$R_v(\omega \cdot \xi) = r \omega_0 [G(\omega_0) \omega_0 (\pi/4 \xi_e - 1) + \int_0^{\omega_0} G(\omega) d\omega]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中等效阻尼比号 $\xi_e = \xi(1 - e^{-2\xi \omega_0 T_d})^{-1}$ 。此式适用于小结构阻尼、宽频带输入的情况。利用上式可以方便地从输入地震动功率谱求反应谱, 也可以用数值迭代方法从反应谱求功率谱。

Unruh 和 Kana^[36] 和 Pfaffinger^[31] 的工作根据同样的原理又略有发展。Kaul^[18] 在宽频小阻尼条件下, 给出下述近似关系

$$G(\omega) = \frac{4 \xi \omega}{\pi} R_v^2(\omega, \xi) / \{-2 \ln[-\pi / \omega \cdot T_d \ln \times (1 - P)]\} \quad (2)$$

它实际上即为前述公式, 但略去了积分项。

(2) 震源和传播介质对反应谱的影响

虽然关于这种影响的研究可以追溯到几十年前, 但实际得到广泛应用则还是近十年左右的事, 其原因除积累了大量资料之外,

在于重要工程设计要求更高的精确度。

例如美国近几年在 N0.50-SG-S1《与核电站选址有关的地震和其它问题》的第3.3.8.1节“适于厂区的谱形”条目中明确指出：“地面运动的谱形，是根据地区内地震震源谱特性的相对影响，以及从震源到厂区的地质材料的衰减特性而定的”。

在一般结构规范中明确规定这种影响的是美国 ATC-3^[6]，此样板规范是由85名专家（包括 Newmark、Housner等曾来我国访问的世界知名专家）经过五年工作后提出来的，可以说是反映了当前的最高水平。此规范开创了在一般规范中正式采用两个独立可变的震动参数来考虑频谱形状变化的先例。编制说明中明确指出：“对于 EPA 与 EPV 的最好理解是，它们是规定一般持时的震动的光滑弹性反应谱的规一参数。 EPA 与 0.1—0.5 秒周期内的谱值成比例， EPV 与 1 秒附近的谱值成比例，比例常数平均约为 2.5”。不同地点的具体 EPA 与 EPV 值则按地震动加速度和速度的变化从 Algermissen 和 Perking (1976 年) 地震区划图导出。场地土条件对谱形的影响也另外作了考虑。图 1 表示不同 EPA 与 EPV 组合对谱形的影响。

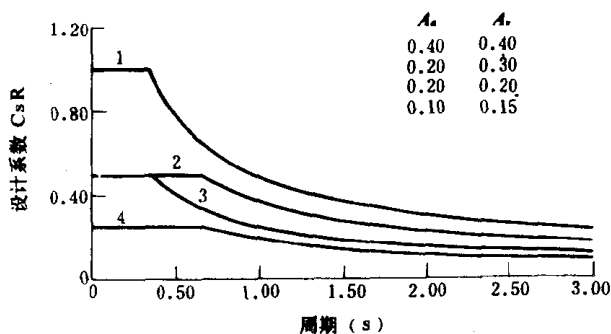


图 1 四个不同地区 S_1 类场地土上的设计系数

(3) 设计反应谱的标定和反应谱的变种

根据强震记录和反应谱的统计分析，Newmark 和 Hall 等

根据地震动最大加速度、速度和位移对弹性反应谱和弹塑性反应谱进行了标定，在过去十年中，他们依据更多的数据逐步改进其结果^[26, 11]。

若干研究者推广了反应谱的概念，在延性谱和时变反应谱^[29]之后，又提出了循环效应反应谱^[30]和倒塌谱^[10]。

(三) 持时与双重破坏准则

持时的重要性是早已从震害经验和破坏积累理论就明了的，但前几十年它在地震工程中的应用一直进展不大。我们认为其主要原因是缺乏在设计中适当考虑这一因素的方法。近几年，这方面有了突破的趋势。

七十年代中，人们认识到强震持时对结构反应的影响主要发生在结构反应进入非线性之后。例如ATC-3^[6]的注释就指出，“反应谱的显著缺点是它未能明确表示振动持时，它只考虑了线性反应中持时的影响。然而，持时的主要影响在于结构反应一旦超过弹性极限后可能发生的强度丧失”。

直到八十年代，人们才较全面地指出，持时的重要意义同时存在于非线性体系的最大反应和能量损耗积累两种反应之中。例如Vanmarcke和赖世声^[38]就曾指出，“持时也是一个在地震时导致结构低周疲劳和土壤液化的关键因素”。依利诺伊大学洪华生领导的研究工作已明确提出结构物的双重破坏准则作为设计依

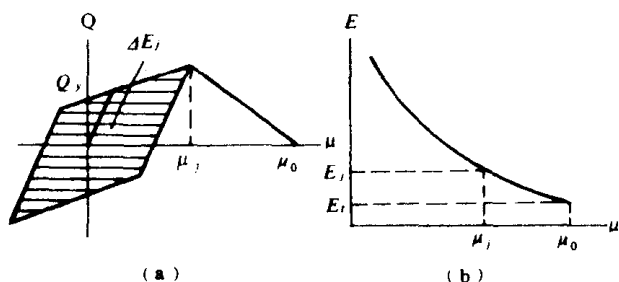


图 2 双重破坏准则

据^[33]，即采用最大反应 μ （强度或变形）和积累的非线性能量损耗 E 这两个指标。图2(b)中给出这一准则的一种表示方法。图2(a)是结构退化型非线性恢复力曲线，当 μ 一旦达到 μ_0 时，即认为结构达到破坏；当 $\mu < \mu_0$ 时，如 μ_j ，则当积累的损耗能量 E 达到 E_j 时，结构亦达到破坏， $E_j = N_j \Delta E_j$ ， ΔE_j 为 $\mu = \mu_j$ 时一次循环所损耗的能量， N_j 为 μ_j 的循环次数。这种破坏准则同时采用了两个独立的反应指标 μ 和 E ，所以称为双重破坏准则。

有了双重破坏准则概念之后，强震动持时的重要性就更容易被理解。这方面的现有研究结果可以总结为以下四点。（1）对于线性体系，强震持时的增加将使地震动与反应出现较大值的概率提高，但这一影响是不大的；（2）对于无退化的非线性体系，持

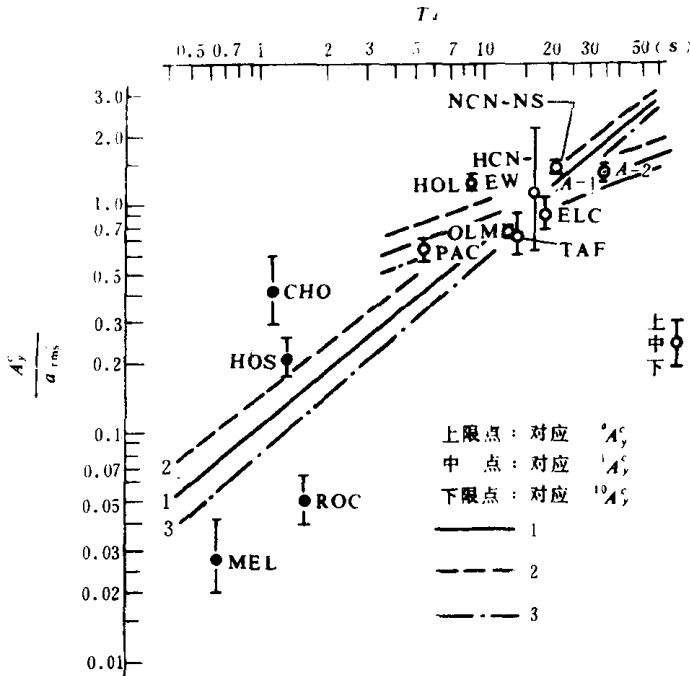


图 3 持续时间与倒塌加速度的关系

1. 中点的回归线；
2. 上限点的回归线；
3. 下限点的回归线

时对最大反应的影响还在于持时的增加使出现较大永久变形的概率提高, 但一般也不大^[1,40]; (3) 对于退化性强的非线性体系或考虑具有下降段恢复力特性的体系, 持时对最大反应的影响可以是很大的。如Takizawa和Jennings^[35]的结果。他们考虑与图 2 (a) 相似的恢复力模型和 $P-\Delta$ 效应, 计算了13个真实地震动过程

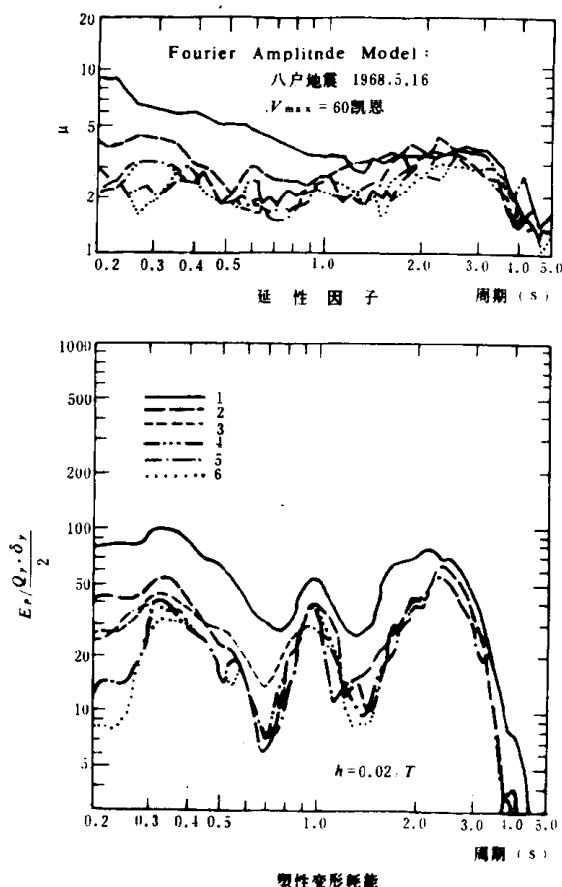


图 4 相对特性对单质点体系
弹塑性反应的影响

1. 八户1968 NS 396 伽60凯恩; 2. 埃尔森特罗1968 NS 418 伽59凯恩;
3. 下北1978 E W207 伽39凯恩; 4. 青森1968 E W298 伽28凯恩;
5. 钏路1968 E W230 伽42凯恩; 6. 宫古1968 NS 233 伽36凯恩