

中 译 本 序

我在冶金工业部安全环保研究院，见到我写的书的中译本感到非常荣幸。这本书将使我的所有中国朋友能从中得到新的讯息。

除了构成本书基础的应变测量和支配频率等基本内容外，还有另外两个需要考虑的重要观点。首先，每当爆破诱导振动大得足以成为严重事件时，被开挖后的岩石的永久位移是不应该忘记的，其次有关的安全规程应该区分人体与结构响应之间的差异

C.H.Dowding

Wuhan

21 April 1989

译 序

多年来，爆破振动一直是国内外爆破领域备受人们关心的课题之一，其中尤以振动极限问题为甚。因为，由于爆破本身和研究对象的复杂性，使其在制定和使用中存在不少困难和模糊的概念。本书作者在全面系统地分析了各国研究的历史和现状的基础上，用事实说明现有的规范在某些情况下过于简化和过分苛刻，认为应依据具体情况建立合适的极限。根据上述思想，作者将地震和核爆炸对结构的影响分析应用到爆破振动的研究中来。对于地上结构以单自由度 SDF 模型为依据，并以反应谱作为建立规范的频率基础；对于地下结构则以激励波长（即结构周围介质的波速）与结构尺寸之比为依据，采用质点速度作为应变强度的指标；同时为建立养护混凝土、围岩、地下巷道和管道、土壤压实、电气设备以及人体等，在不同条件下爆破的振动规范提供依据。

本书始终贯穿着理论和实践相结合的原则，因而，既是一本爆破振动理论的参考书，又是一本爆破设计和监测的手册；书中勾划出了爆破设计以及振动的监测、控制和分析的现状和前景，并收集了大量实验和现场观察的数据，如第十章以整章的篇幅为读者提供了为制定安全规范而作的试验背景、细节和结果，有利于读者深入分析、判断和应用。本书内容十分丰富，几乎包括了各种爆破引起的振动问题，是爆破工程技术人员难得的一本好书。这本中译本的出版，相信将对我国爆破振动的研究起到一定的促进作用，译者不揣浅陋，以此奉献给读者参考。

本书第 1、12、13、14 章由高级工程师李香灿译、第 2、3、4 章由工程师郭扬译，序、前言及第 5、6、7 章

由陆来译，第8、9、10、11章由彭电华译，第15、16、17、18章由李孝林译，全书由陆来、李香灿校；译者力求做到正确无误按原意译出，但由于我们水平有限，肯定有错误不妥之处，恳请读者批评指正，不胜感激。

译者 1988.8

第 1 章 绪 论

为什么写这本书？

本书将搁在书架上的科研参考文献加以浓缩，为爆破振动监测提供一个方向，这在一篇论文中是无法做到的。振动方面积累的知识和混乱状态不可能在二十页纸内简单地分开。

十五多年前，我就开始从事爆破振动响应方面的工作了，从那以后，结构动力学完全成熟了，然而还没有多少核爆炸防护设计和地震工程学有关领域的经验渗透到爆破领域。为努力突破这一障碍，试图将结构动力学方面的进展移植于爆破振动监测中。这是一种尝试。这种移植不想在高深的数学水平上进行，因为这样做收效甚微。相反，想采用简化的物理模型和实际结果，使读者个人加深理解，并确信这些新发展有用。

相关的新成果、新测试仪器、新分析技术和新规则的论文接踵而来，不断地冲撞着数年来几乎作为每个物体临界振动强度 50mm/s (2in./sec) 的依据。本书指出了在考虑频率、结构类型和建筑材料等条件后为什么高、低极限都是合理的原因。这些条件使爆破振动监测更加复杂，但是，这样做比制定一种符合所有情况的规范具有更多的真实性。

正如不同的安全爆破规范能用理论研究证明是合理的一样，也能被实验证明是合理的。本书广泛收集了分散发表在杂志上的实验总结，为涉及以下物件爆破时建立不同的规范提供依据：

养护期混凝土

围岩

混凝土块

土壤密实

电器设备

巷道和管道

最后，在第14章中，试图窥视电子计算机化的未来。廉价的微机已改造成监测用的仪器。然后比较了一些数字式爆破监测系统，还讨论了个人计算机的使用，供进一步分析。

谁使用这本书？

因为爆破振动是由土木工程师、采矿工程师、以及地质物理学家和工程地质学家进行监测和控制的，所以本书对很多领域的读者应该是有价值的。完全不同的分类将使本书难以编写。地质学家对振动在岩石和土壤中的传递最感兴趣，而土木工程师对建筑物的响应感兴趣。采矿工程师主要对爆破设计感兴趣，而土木工程师在开挖岩石时对此亦感兴趣。

以一定的专业水准来介绍这些资料，因为作者设想读者已经受过高等专科学校或大学本科的教育或正在高年级学习。本书主要是为土木工程、采矿工程以及地球物理学等专业的实习和研究生而写。

如何编写本书？

在爆破过程中引起关注的具体学科范围的这些章节保持短小精悍。从目录上可以看出，关于主频的预报、巷道和管道的响应、空气冲击波等列有单独的章节。因而，读者可立即翻到最感兴趣的专题。如果需要进一步的背景材料，后

面还有理论方面的基本章节，如计算地面应力、响应谱和立方根换算。

本书意在完善其他关于爆破设计的新书，其他书籍中振动和监测方面的内容一般只占10~20%，而本书相反，振动方面的内容占了80%。爆破设计内容已包含在第15至18章中，使读者可以不必参考别的书就熟悉其过程。当然，不常见的爆破设计应参考其它书籍。

为什么频率是重要的？

本书的基本主题是频率的重要性。结构动力学的研究已经表明，当结构受到了各方面都一样，而主频率不一样的振动激励时，其响应不一样。一幢住宅结构对主频率为80Hz，速度为12mm/s (0.5in./sec) 的地面运动的响应比10Hz的要小。因此，80Hz的运动使结构破裂多半比10Hz的少。

人们对频率重要性的认识，导致了必须采用包括频率在内的振动监测方法的产生。最简单的方法是，地上结构以单自由度(SDF)模型为根据，而地下结构以激励波长与结构尺寸之比为根据。SDF模型一般用于响应谱，而有关波长的原理用来了解埋入式结构周围介质的传播速度。

响应谱——建立规范的频率基础是根据计算的系统响应作图的。在数学上，该系统等价于重物悬挂在一连串橡胶带上。只要你阅读了这本书，就能在书桌上建立起这种简单模型。在第5章中，用这种模型说明响应谱是如何将振动强度和频率结合起来考虑的。

为什么爆破设计包括监测在内？

爆破最好用一个操作标准来控制，而不是用生产过程的

技术要求,例如用在不同频率下的许可质点速度来控制。不幸的是,这种作法通常提供的是一个规定的标准,没有认识到爆破员所面临的种种困难。一个例子就能说明这样无知的危害。

大多数爆破设计靠限制任一瞬间(段)起爆的药量来控制振动强度。设计也必须保证在给定体积的岩石内起爆足够的炸药,使岩石充分地破碎,以便搬运。

当爆破靠近结构时,虽然单位体积岩石的起爆药量保持不变,但设计的任意一段起爆药量必须减少。换句话说,爆破必须以时间而不是以空间来分隔。这种分隔可通过在单位体积岩石上多钻孔或在单个炮孔内分段爆破来达到目的。不幸的是,任何一种抉择都比较昂贵,实行都比较困难,两者不是增加爆破次数,就是延长爆破时间。增加爆破次数,就增加发生事故的概率以及引起邻近房产主的烦恼,成本亦就明显地增加。

因而,有一个最佳值,否则,降低允许的振动强度(和每段起爆药量),实际上往往会增加困难。若那些制定规范的人熟悉爆破设计,可能只对最佳值敏感。本书使读者不花很大精力就能熟悉爆破设计。

爆破诱发表面性破裂

头发丝大小的表面细裂缝定义为破裂阈值,它们与结构的稳定性不相关,因观察困难,几乎总是在讨论爆破诱发破裂时被忽略了。

在受规章限制的范围内,爆破诱发破裂的现象是以直观的表面裂缝为基础的,因为这些头发丝大小的裂缝在最低振动强度情况下出现。所有的房屋都有许多表面裂缝,因而,将爆破诱发的表面裂缝和自然发生的表面裂缝区别开是非常

困难的，也是相当费时的。由于结构会自然破裂，爆破前后立即记录表面裂缝情况是必不可少的，以便区别出爆破诱发的那些裂缝。

对破坏墙上复盖材料所需要的爆破振动和日常活动在墙上产生的应变进行比较，给出在低振动强度情况下观察破裂的看法。最近的测量表明，在活跃家庭的日常生活过程中，墙上会产生类似于 2.5 至 12mm/s ($0.1\sim 0.5\text{ips}$) 爆破振动产生的应变。最惊人的测量结果是，温度和湿度的日常变化，在墙上引起的应变相当大。仅仅这些就大得足以破碎普通的熟石膏。

规章怎么样呢？

没有迫使地区之间各种各样规章相一致的企图，而是介绍并比较了形成管理决策数据库的基础科学研究。充分了解这些研究，就能评价任何规章的保守性。

在制定规章的过程中，必然是选择保守的极限，因为它不能与政治因素分开。政治因素一般强调规定社会上能接受的发生破裂的概率。近来，由于重复爆破，人体的烦恼已变成一个重要问题。尽管烦恼会影响规章极限的选择，但烦恼与破裂其性质截然不同。

本书如何促进实践？

实践中碰到的问题曾作为写作本书的指南。因此，作者将实践中已成功地应用过的许多方法包括在内。除了通常提出的有关预报和解释质点峰值速度的方法以外，还包括回答以下监测中特有的问题。

用什么方法能预报爆破诱发地面运动的支配频率？

一个简单的方法是根据爆破前的资料来计算支配频率。

如何修改爆破设计以减少振动？

逐步概述了一种既能减少振动，又能保持产量的设计方法，并附有例子。

用什么方法能简单地说明响应谱分析？

利用一个简单的橡胶带模型来说明响应谱没有复杂的等式。

你想知道如何得到一个爆破振动极限（其支配频率是高的）的例外情况吗？

在确定安全爆破强度时，本书说明的响应谱技术考虑到频率成分。

如何更好地进行爆前调查？

介绍了进行裂缝调查的方法和格式。

用什么方法能迅速确定比例距离衰减关系式？

用爆破试验方案的例子说明，在仅有的几次爆破后，就能确定衰减关系的方法。

你需要为像电气设备、管道、养护混凝土等独特的环境建立安全爆破极限吗？

实验结果的总结能合理地确定有关这些和其它许多非建筑物的极限。

什么是低强度、重复振动的效应？

所介绍的最新实验结果第一次对这个因素给出估计。

第五章简介

单自由度响应谱模型的由来？

单自由度响应谱模型的优点？

什么是伪谱响应速度？

响应谱是如何在外界因素的作用下产生变化的？

响应谱界限？

傅里叶谱与响应谱有什么不同么？

这些问题都在本章中做了详细的介绍。最近的这些年里，我们对地震和核爆炸的效应做了很多的研究，但实际上还不曾把这些研究成果运用到爆炸振动分析中使用。本章就针对爆炸振动分析做了详细的介绍。

本章通过开头的橡皮带加剪刀的模型介绍，从而引出了单自由度响应模型的概念并对其做了详细的介绍。之后通过由此模型产生的响应谱及伪谱响应速度更好地诠释了在爆炸振动过程中的结构响应。

第五章 响应谱与结构响应

响应计算的由来和简化

最近20年，获悉了大量关于结构动力响应的知识。其中大部分来自地震和核爆炸效应的研究，实际上还不曾被介绍到爆炸振动分析中使用。本章移植这个最新经验，供常规爆炸中使用。

本章用一个简单的橡皮带加剪刀的模型开头，使读者能够建立激励频率影响结构响应的试验。直到现在，著名的又仍然难以理解的单自由度（SDF）响应谱模型是根据剪刀、模型解释的。SDF模型的优点，在题为“SDF响应更好些？”一节中说明。

橡皮带的响应谱

与频率和距离有关的安全爆破手册(Medearis, 1976; Siskind et al., 1980b)，是建立在对单自由度系统——观察如图5-1a所示的橡皮带挂着剪刀——对频率灵敏特性的观资料基础上。用一把大剪刀（或其他重物）的简单实验能说明，为什么在控制爆炸振动引起破裂的可能性中，其频率是重要的。在数学上，剪刀加橡皮带等价于图5-1b住宅结构中质量附加在弹簧上的（SDF）模型。观察到的任意剪刀响应可以用描述数学模型特性的运动方程计算。这个数学模型是用来计算响应谱的SDF系统。

将几根橡皮带系在大剪刀上，然后将剪刀的基面（你的手）向上运动一数量 u_0 ，如图5-1c剪刀位移时间历程所

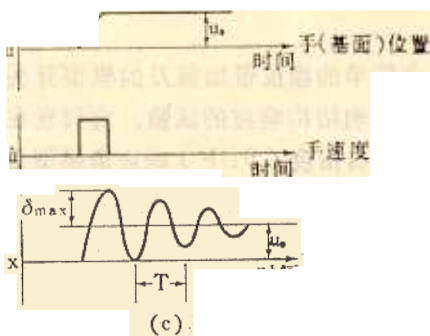
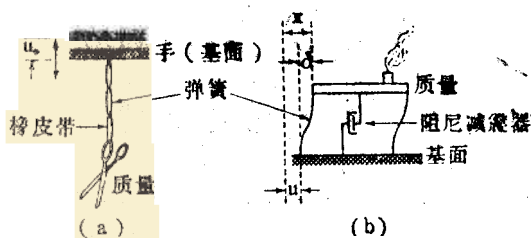


图5-1 橡皮带和剪刀的单自由度模型

(a)一剪刀模型；(b)一结构的数学模型；(c)一剪刀运动历程示，它在新位置附近振动的幅度会减少。手的运动等价于图5-1c所示的永久地面位移 u_0 ，并且可以用速度 \dot{u} 的脉动描述。在振动过程中，橡皮带的伸长量是相对位移 δ ， δ 类似于会导致破裂的结构应变。幅度的衰减率与系统的阻尼成比例。阻尼越高，振动平息能越快。振动一次的时间 T 是系统的固有周期，即固有频率的倒数($T=1/f$)。

把橡皮带加剪刀看作是一幢房子。很慢地上下移动系统一段距离 u_0 ，注意到橡皮带没有伸长。现在移动系统同一距离 u_0 ，但在等于系统固有周期的间隔内反复移动，注意橡

皮带大大伸长。这个响应类似于对爆炸低频振动的共振响应。现在上下移动系统同一距离 u ，*，但很快。用这方法移动系统，橡皮带伸长可能总是比第二步的要短得多。这种快速运动等价于近距离爆破引起的相当高频率的振动。因此，以高于结构固有频率的频率运动产生小伸长或小应变。

*译者注，原书中为 u ，改为 u_0 。

在例子的最后高频一步中，记住你的手臂如何比第二步运动得更快。那个速度等价于地面的质点速度。如上一个例子所示，较高的质点速度所产生的伸长或应变（破裂的可能性），假如出现的频率显著地大于系统固有频率时，实际上总是比较低的质点速度的小。

不同的SDF系统对同一爆炸振动的最大响应的标绘图称为响应谱。不同的系统总是各有一个不同的固有频率。在剪刀例子中，减少橡皮带的长度，就会增加它的固有频率或减少它的固有周期，从而改变它的响应。试一试，再领会这些。不同长度的橡皮带系统对手同一运动的最大响应，与其固有频率对照标绘就是一个响应谱。它是一个谱。因为它能指出不同系统对同一激励运动的响应范围，即响应谱。

SDF模型的由来

讨论爆炸振动引起破裂的可能性，最好能从结构对短暂振动响应的观点来看。一个临界响应因素是结构部件之间或同一结构部件上不同点之间发生的不同运动的总和。因为它引起应变，又引起破裂。

为了计算实际结构或结构部件中可能发生的不同位移，有必要简化结构，使计算结果是实用的，在振动加载下，决定结构行为最简单的特征是：（1）主要部件的质量，（2）

主要部件的刚度，以及（3）因破裂、接缝和连接机构的不均匀运动消耗的能量。说明三个简化特征的动力相互作用的模型，是如图 5-1b 所示的 SDF 系统，集中质量模拟主要部件的质量，弹簧相当于主要部件的刚度，而减震器通过粘性阻尼模仿能量的消耗，位移差 δ 是质量的绝对位移 x 和地面的绝对位移 u 之差。

考察如图 5-1b 所示的建筑物模型。集中质量是模拟实际结构的地板质量，垂直弹簧是模拟实际结构的墙，而减震器如同实际结构中连接机构一样吸收能量。这个比喻表明，既然只考虑一个方向移动，一、二层建筑物和一些三层建筑物的行为，完全类似于 SDF 系统的行为。如果考虑多层结构，将结构模仿为多自由度系统是必要的。然而，若只对一个响应方式感兴趣，即使这样一个系统，也可以理想化为一个单自由度系统。

SDF 数学模型

如果图 5-1a、b 中 SDF 系统受到地面激励，其运动方程是

$$m\ddot{x} + c_1\dot{\delta} + k\delta = 0 \quad (5-1)$$

其中， \ddot{x} 是质量 m 的绝对加速度， c_1 是阻尼系数， $\dot{\delta}$ 是质量相对地面的速度， k 是线弹性常数，而 δ 是地面和质量之间相对位移。利用相对位移关系式 ($\delta = x - u$ ，如图 5-1b 所示)，式 5-1 变为

$$m\ddot{\delta} + c_1\dot{\delta} + k\delta = -m\ddot{u} \quad (5-2)$$

无阻尼弹簧-质量系统的固有圆频率 p 等于 $\sqrt{k/m}$ ，临界阻尼比 β 等于 $c_1/2\sqrt{mk}$ 。当 c_1 等于 $2\sqrt{mk}$ 时，若将质量

从平衡位置移开，尽管释放了，它也不会振动，而总是返回到它的平衡位置。在这个条件下，系统被认为是临界阻尼的。阻尼系统的固有圆频率 p_d 等于 $P\sqrt{1-\beta^2}$ ，式5-2用临界阻尼比 β 和固有圆频率 p 来表示，可以改写成

$$\ddot{\delta} + 2\beta p \dot{\delta} + p^2 \delta = -\ddot{u} \quad (5-3)$$

地面加速度时间历程是时刻0到时刻t的总和，用 $u(t)$ 表示。

*译者注：原书中无“-”号。

因此，为了准确地模仿结构，若结构的无阻尼固有频率 p 及其临界阻尼比 β 已知，不必假设 m 、 k 和 c_1 的特定值。而且，动力特性 p 和 β 能根据建筑物响应的自由振动时间历程估量，它比根据 m 、 k 和 c_1 的估算值计算更精确。用这些实测参数自然能计算难以定量的系数，如柱的稳定性（刚性）（它影响 k ）和阻尼系数 c_1 。

实测振动响应的结构特性

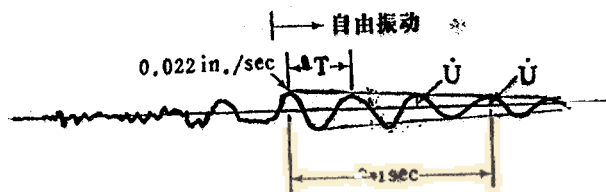
一个结构的自由振动响应记录，如图5-2所示。这个记录是一个速度时间历程，它是在一幢六层公寓建筑物的六层楼板处，沿平行建筑物短轴的水平方向监测到的。第一振动模态的阻尼固有周期标记为 T 。该周期与无阻尼固有圆频率 p 有关，并表示为下列形式：

$$T = \frac{2\pi}{p_d} = \frac{2\pi}{p\sqrt{1-\beta^2}} \quad (5-4)$$

临界阻尼系数可以根据建筑物自由振动的衰减，用关系式

$$\beta = \frac{1}{2\pi} \left(-\ln \frac{\dot{u}_{n+1}}{\dot{u}_n} \right) \quad (5-5)$$

求出。其中， u_n 和 u_{n+1} 是相邻的幅度 (Thompson 1965)。



$$T = \text{阻尼周期} = \frac{2\pi}{p_d}$$

$$\text{小}\beta\text{值时, } \beta = \frac{1}{2\pi} \left(-\ln \frac{\dot{U}_{n+1}}{\dot{U}_n} \right), \quad p = p_d \sqrt{1 - \beta^2} = p_d$$

图5-2 建筑物典型的自由振动响应

结构包括许多部件，而最重要的二个是墙和上部结构的框架。在图5-3中，比较了墙和上部结构对同一爆破的响应。如图5-3b所示，上部结构响应用安装在结构角上(i)的传感器测量，而墙的响应用墙中央(ii)的传感器测量。这二个传感器都测量绝对运动。如图5-3c所示，上部结构角上的运动与框架的剪切和扭曲有关，而墙中央的运动与那堵墙的弯曲有关。

在图5-3a中可以看到，在地面运动通过后，墙和上部结构继续自由地振动。墙的运动幅度往往比上部结构的大，而且在自由振动期间，其频率比上部结构的高，详细的研究 (Dowding et al., 1980; Medearis, 1976) 表明，墙的固有频率是12至20Hz，而上部结构是5至10Hz。

在自由响应期间，图5-3a中响应运动的峰值迅速减小。这个衰减越大，称为结构的阻尼越高。详细的研究表明临界阻尼为2~10%。

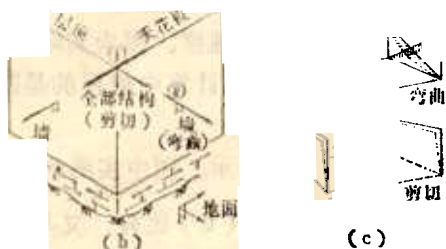
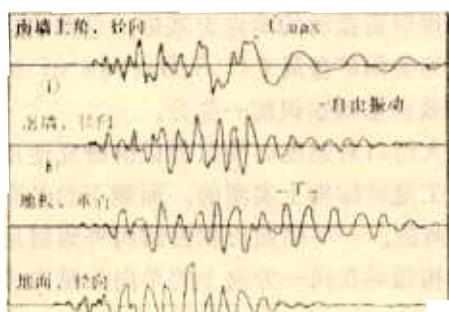


图5-3 上部结构和墙的运动

a) —运动; b) —传感器的位置 (i和ii) 和敏感方向;
c) —上部结构剪切和墙弯曲

SDF 响应更好些?

Langan (1980) 已证明, 实测的结构响应同计算的 SDF 响应相关, 比同地面运动峰值相关更好。这意味着, 假定它们与响应谱值成比例, 比假定它们与地面运动峰值成比例, 可以更好地估计结构运动。这个改进的相关性, 主要是考虑根据 SDF 响应计算响应谱频率的结果。

Langan 的研究是以测量 22 幢住宅结构对各种各样建筑

工和露天采煤爆破振动的响应为基础。这些响应和地面运动的测量，成为美国矿务局（U.S. Bureau of Mines）在努力发展爆破效应基础知识的一部分。

实测了大约41对速度时间历程以供研究使用。其中14对是靠近硬岩工地的结构上实测的，而剩下的是靠近露天煤矿的结构上实测的。一对时间历程由结构外地面运动和墙角上方的上部结构运动在同一方向上的单向分量构成，如图5-3所示。

为了同实测的上部结构作比较，SDF响应谱根据地面运动计算。因为实测的上部结构响应是一个绝对速度，式5-3就必须修改成能计算绝对速度。因为实际结构的动力响应特性通常不能确切知道，在计算中使用的是阻尼和基频的总平均值。

研究的结果如图5-4所示，图中实测的上部结构峰值速度既与地面质点峰值速度（ u ）比较，又与SDF计算的速度比较。为此，标绘了平均相关线和 ± 1 标准差线。对于高频成分的施工爆破来说，用地面峰值速度作为上部结构响应速度预报值，比SDF模型差得多。这不应当吃惊，考虑到施工爆破同固有频率较低的住宅上部结构比较，它的高频占优势。对低频的煤矿爆破，SDF或地面速度都能作为结构响应预报值。

图5-4中均值斜率和标准差的下列统计（附表），能进一步证实SDF方法的优越性。地面速度和实测速度相关性的标准差很大，表示图中 $u_{m,x}$ 的散布显著。对于SDF速度和实测速度的相关性，接近1的斜率表明SDF计算值具有结构的平均响应特性，对于这一平均特性，无需修改就同实测的上

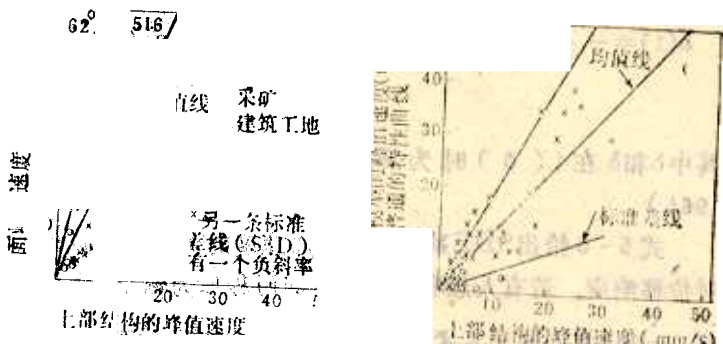


图5-4 地面峰值速度和SDF计算的速度值
作为上部结构测量速度预报值

附表	
斜率(均值)	标准差
	0.75
2.49	2.93

部结构响应相关。对于支配频率无论高的还是低的爆破来说，这个相关性总是有效的。

响应谱和伪谱响应速度

前面讨论了特定的结构对特定的地面运动响应的论述。然而，为了区别不同类型的地面运动及其不同的破裂可能性，广泛比较波对各种各样结构的影响是必要的。响应谱可以根据式5-3的解进行计算，它能为这种比较提供途径。

式5-3对任何时刻相对位移的解，可以用地面绝对加速度时间历程的Duhamel积分表达为

$$\delta(t) = \frac{1}{p\sqrt{1-\beta^2}} \int_0^t \ddot{u}(\tau) e^{-\beta p(t-\tau)} \sin(p_d(t-\tau)) d\tau \quad (5-6)$$

其中 δ 和 $\dot{\delta}$ 在 $t(0)$ 时为零 (Veletsos 和 Newmark, 1964)。

式 5-6 给出 SDF 系统用地面加速度时间历程计算的相对位移响应。若有人想利用速度时间历程作为输入时间历程， \dot{u} 和 δ 之间的关系式可以通过对式 5-6 分部积分，然后合并项求得 (Veletsos 和 Newmark, 1964)。得到的等式可以表达为

$$\delta(t) = - \int_0^t \dot{u}(\tau) e^{-\beta p(t-\tau)} \left[\cos(p_d(t-\tau)) \sqrt{\frac{\beta}{1-\beta^2}} \sin(p_d(t-\tau)) \right] d\tau \quad (5-7)$$

t_0 时， δ 和 $\dot{\delta}$ 为零。

当一个如图 5-3a 所示的径向地面运动的质点速度时间历程用式 5-7 计算处理时，算出了与该图上角类似响应的一个时间历程。然而这时间历程是一个上角相对位移，而不是测量的绝对速度。计算的相对位移时间历程会有一个最大值 δ_{max} 。若将计算的最大相对位移同结构的固有圆频率 p (即 $2\pi f$) 相乘，得出的乘积

$$PV = 2\pi f \cdot \delta_{max} \\ = p \cdot \delta_{max}$$

称为伪速度 (PV)，其他人 (Meuëaris, 1976) 曾经称过伪速度为伪谱响应速度 (PSRA)。若与 δ_{max} 有关的脉冲大致是正弦波的，这伪速度就是相对速度 $\dot{\delta}$ 的一个准确近似

值

响应谱和三用图纸

一个地面运动的伪速度响应谱——如图 5-5 中七段采石爆破的谱——是当许多不同SDF系统被地面运动激励时根据它们的 δ_{max} 值绘出的。考虑同一结构的二个不同的部件，即10Hz的上部结构和20Hz的墙。若将七段采石爆破的地面运动 $u(t)$ 就 $f=10$ 和20Hz用式 5-7 处理了二次，而 β 保持3%不变，于是就产生二个 δ_{max} 值。

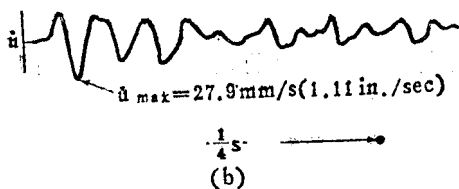
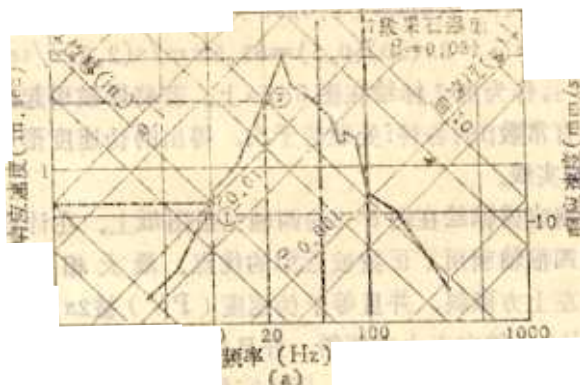


图5-5 响应谱作图

a) —响应谱。() —有关激励的时间历程

首先计算10Hz 它的固有圆频率是

$$\omega = 2\pi (10)$$

因而得到

$$\delta_{m,xx} = 0.25\text{mm} (0.01\text{in})$$

然后将这个 $\delta_{m,xx}$ 转变为PV

$$PV_{10} = P\delta_{m,xx} = 2\pi(10)(0.25) = 15.7\text{m/s} (0.62\text{in/sec}),$$

并且作为点1标绘在图5-5a上。其次，对20Hz系统重复同样的计算。

$$= 2\pi (20)$$

$$\delta_{m,xx} = 0.5\text{mm} (0.02\text{in})$$

$$PV_{20} = 2\pi(20)(0.5) = 63.5\text{m/s} (2.5\text{in/sec})$$

并将 PV_{20} 作为点2标绘在图5-5a上。若将爆破引起的地面运动具有常数 β 的各种 f 处理若干次，得出的伪速度形成图5-5a中的实线。

将响应谱标绘在图5-5的四轴三用图纸上。在计算伪速度时这四根轴利用了正弦波近似的优点。最大相对位移 δ 的轴向左上方倾斜，并且等于伪速度(PV)被 $2\pi f$ 除。伪加速度(PA)轴向右上方倾斜，并且等于PV乘以 $2\pi f$ 。PA和PV称为伪加速度和伪速度，因为它们都是正弦波近似。然而，对于小 β 值系统而言，这些简化准确地近似质量的绝对加速度和相对速度 (Veletsos和Newmark, 1964)。

为了迅速地表现准正弦曲线的运动，三用图纸是极其有用的，因为它用图纸去描述频率和最大振幅之间的数学关系。考虑10Hz系统对图5-5a中采石爆破的响应，其中 $\delta_{m,xx} = 0.25\text{mm} (0.01\text{in})$ 。一个固有频率 f^* 为10Hz的结构以正弦波响应，会有一个最大伪速度(PV)和伪加速度(PA)。

$$PV = P\delta_{m,x} = 2\pi(10)(0.01) = 0.625 \text{ in./sec} (16 \text{ mm/s})$$

$$PA = P^2\delta_{m,x} = 4\pi^2(100)(0.01) = 39.5 \text{ in./sec}^2 = 0.19$$

若只有 $\delta_{m,x}$ 和 f 被标绘, 这些最大值可以从三用图纸上直接读出。在图 5-6中提供一张空白三用标绘图纸, 供将来使用。

译者注: 原文为P

有些响应谱曾经用相对速度 $\delta_{m,x}$, 而不是伪速度 $p\delta_{m,x}$ 描述。然而, 能直接从伪速度求出相对位移, 在物理上更有意义, 因为相对位移直接产生结构部件的弯曲应力和应变。由于这个原因, 伪速度在响应谱中使用得更经常。

在动力加载过程中, 结构受到一个基础剪力, 它是结构绝对加速度 \ddot{x} 的函数。因此, 知道用伪加速度 $p^2\delta_{m,x}$ 近似绝对加速度 \ddot{x} 好些是有用的。参考式 5-3, 并用 θ 代替 β , 用 $-x$ 代替 $\delta-u$ (相对位移的定义), 可以看出 $\ddot{x} = p^2\delta$ 。因此, 小 β 值时, 绝对加速度等于伪速度。

响应谱形状的变化

根据距离采石场七段爆破72m(236ft)远处地面的水平运动, 计算了3%临界阻尼伪速度响应谱, 如图 5-7中曲线A所示。延期间隔是34ms, 每段90kg(200lb)甘油炸药。图 5-7中曲线B描述一个根据谐波加速度半脉冲($f = 0.01$ Hz, $u = 0.001g$, $u = 3.04 \text{ cm/s} (1.2 \text{ in./sec})$, 和 $u = 15.2 \text{ cm} (6 \text{ in.})$)计算的3%临界阻尼响应谱。组内最强最宽的响应谱, 是EI Centro, California测量的1940年Imperial Valley地震的响应谱。爆破振动响应谱同EI

Centro地震和谐波脉冲的比较表明，爆破振动给出的响应谱更相似于谐波运动而不是地震运动，地震运动包含一个宽的频率范围。而且，爆破振动占优势的频率一般比地震地面运动的高。

*译者注：原文为1.5。

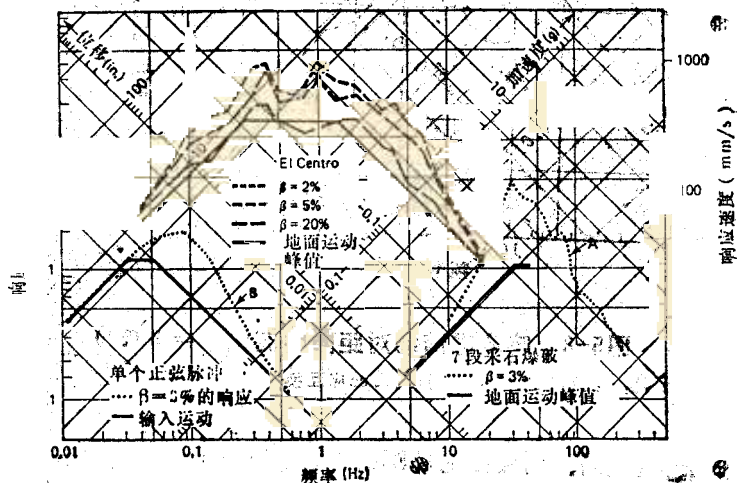


图5-7 地震，正弦曲线和爆破振动的响应谱

响应谱的主频率随着到爆源的绝对距离 R 的增加（比例距离保持不变）而降低。这是期望的变化，因为地球的材料不传递很靠近爆源所遇到的高频脉冲。图5-8中的响应谱是根据比例距离相近、而绝对距离不同处记录的运动计算的，通过比较，可以看到这个主频率降低的例子。

若实测的地面运动是由起爆若干段等间隔爆炸产生，响应谱就在延期间隔对应的频率处变尖。在图5-9(图中的 R/W 应改为 $R/W^2/1$ 。译者)中可以看出这种改变，图上的谱是根

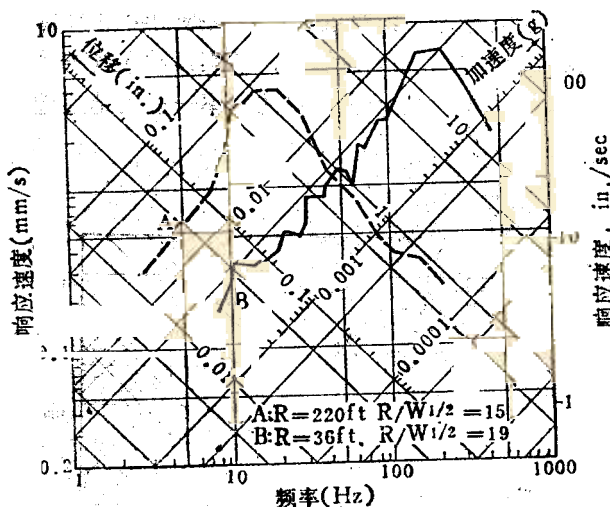


图5-8 响应谱随绝对距离的变化 (= 3%)

*译者注：原图有错，mm/s与in./tec应互换。

据段药量相同、到爆源绝对距离相同处实测的运动计算的。唯一的差别：一个是单段爆破，而另一个是由七个段组成的爆破。

在距离大于30m (100ft)，通过岩石传递的主要传播频率范围从20~100Hz，而对于土壤，大约发生在6~50 Hz。土壤 ($c_1=1200\text{m/s}=4000\text{ft/sec}$) 与岩石 ($c=4100\text{m/s}=13000\text{ft/tec}$) 之间不同的传播频率，可以通过比较图5-10所示的响应谱得知。这些谱是根据比例距离相近处单段爆炸记录的运动计算的，比例距离的换算是以能量条件为基础的，并包括如第6章说明的地震速度。

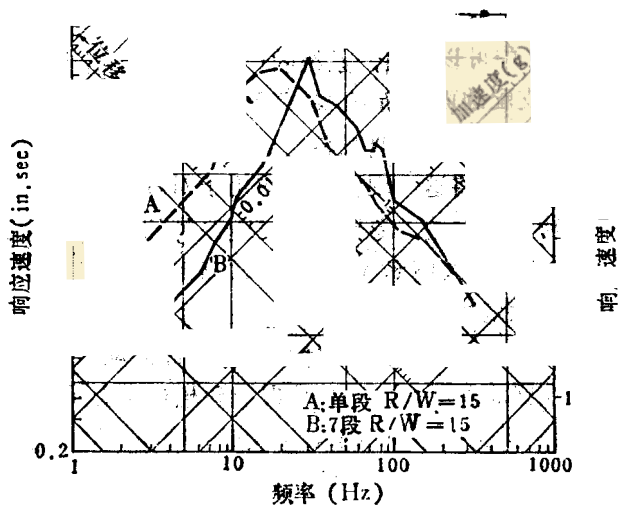


图5-9 响应谱随段数的变化 β

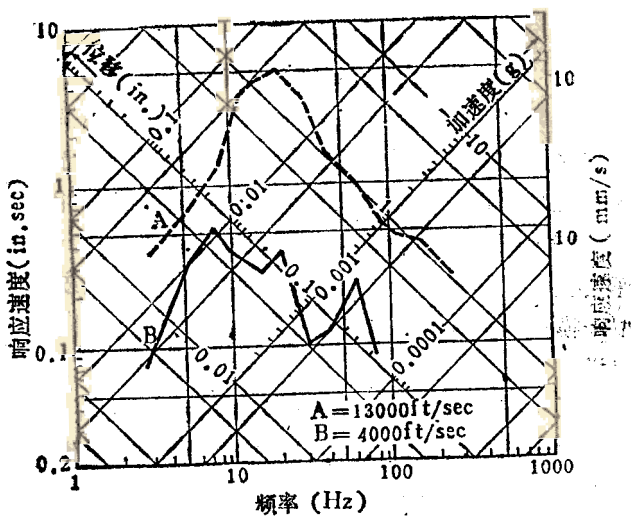


图5-10 响应谱随地震波速度的变化 ($\beta=3\%$)

响应谱及频率的重要性

从图5-7中可以看出，系统的 $f (=p/2\pi)$ 值远比EI Centro地震支配地面运动的频率 W 大($>10\text{ Hz}$)或小($<0.1\text{ Hz}$)时，其响应曲线各自集中在最大地面加速度和最大地面位移上。将这一观察结果应用于对爆破振动响应具有高、低 f/W 值的系统，鉴于构成这一系统的结构的固有频率 f 与爆破振动的输入频率 W 之比非常高或非常低来解释其响应曲线出现的集中现象。

相对高的输入频率发生，结构的 f 在地面运动（岩石上近距离爆破）谱的左手边。这种情况能理想化成大质量系在软弹簧上，由于系统固有频率相对输入运动的低（小 f/W 值），系统的质量直至峰值运动通过后，才起反应，在峰值运动冲击系统的瞬间，质量和地面之间的相对位移等于最大地面位移。这种情况可以用手快速运动带有许多橡皮带的剪刀模型重现。剪刀总是保持不动。

在谱的一边，相对低的输入频率情况（大 f/W ），可以理想化成小质量系在硬弹簧上。由于在弹簧上只需要一个相对小的位移，传递的力就足以克服质量的惯性力，于是高 f/W 的地面运动不能代替没有假设质量的弹簧。因而相对位移随 f/W 的增加而趋于零，质量与地面一起运动，因此，质量的加速度就等于地面的加速度。这种情况与没有橡皮带的剪刀模型一模一样。相对位移是零，而剪刀的加速度同手（地面）一样。

因此，如我们早先讨论橡皮模型时解释的那样，同一结构对不同爆破响应的相对位移，随输入运动的支配频率而变化。因为相对位移是造成破裂的主要原因，支配频率会影响破裂的可能性。

响应谱界限

在低 f/W 值(对EI Centro地震来说, $0.04 < f < 0.4$ Hz)时, 响应谱略平行于峰值地面(或输入)位移。响应谱的这个部分称为位移界限, 因为响应可以近似为一个放大系数 A^* 与峰值地面位移 u 相乘。在高 f/W 值(对EI Centro地震来说, $2 < f < 10$ Hz)时, 响应谱略平行于峰值输入加速度。响应谱的这个部分称为加速度界限, 因为响应可以近似为某个放大系数 A 与峰值地面加速度 a 相乘。谱的内部区域称为速度界限, 因为谱的包络线可以指定为某个放大系数 A 与峰值地面速度 \dot{u} 相乘。

*译者注: 原文为 A 。

伪速度解释为应变

因为破裂是由相对位移或应变引起的, 所以有必要将响应谱的伪速度解释为应变。这样一个解释分二步完成, 首先伪速度(PV)必须回到相对位移 δ 来解释, 通过定义

$$\delta_{max} = \frac{PV}{2\pi f_d} \quad (5-8)$$

其中 f_d 是结构的阻尼固有频率。典型的结构有 $f_d \cong f$ 。

如图5-1所示, δ_{max} 是结构最大位移和地面位移之差。因此相应的应变是与 δ_{max} 有关的变形状态的函数。如图5-11a所示, 框架的剪切和/或平移产生剪应变 γ , 同时墙弯曲, 并伴随剪切, 在墙上产生张应变 ϵ , 如图5-11b所示。

第二步是把 δ_{max} 解释为剪应变或张应变。最简单的是平动那种情况, 如图5-11a的正视图所示。剪应变是角度的变化, 小角度时有

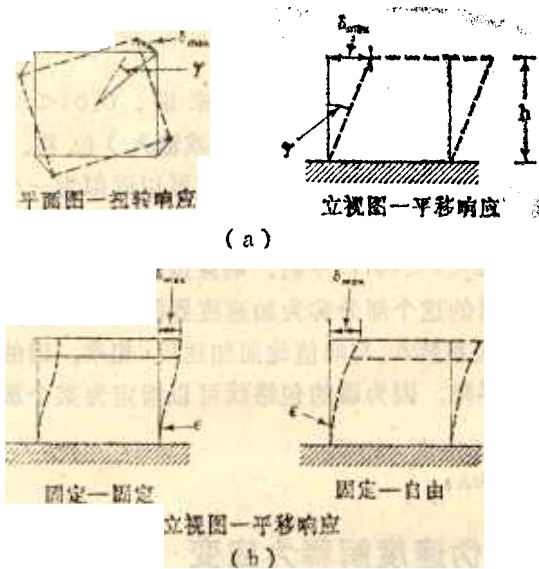


图5-11 变形和弯曲形状

a) 一框架的剪切; (b) 一端的弯曲

$$\gamma_{max} = \frac{\delta_{max}}{h} = \frac{\tau_{max}}{G} \quad (5-9)$$

其中 τ_{max} 是最大剪应力, 而 G 是弹性剪切模量 (Timoshenko 和 Goodier, 1970)。

图 5-11b 中图解的弯曲应变可以根据梁理论估算为

$$\epsilon_{max} = \frac{\sigma_{max}}{E} = \frac{M_{max} d}{EI} \quad (5-10)$$

其中, M 是最大力矩, d 是梁的中性轴到外层构造的距离 (墙厚), E 是杨氏弹性模量, I 是梁 (一堵墙) 的惯性矩。在这种情况下, 梁包括整堵墙、砖、墙框架和内部墙板。而且, 对固定-固定或固定-自由的约束条件来说, 最大力矩可表达

去

$$M = \frac{\delta_{\max} 6EI}{l^2} \quad \text{或} \quad \frac{\delta_{\max} 3EI^2}{l^3} \quad (5-1)$$

其中， l 是梁的长度。因此，墙弯曲应变可以用式5-11代入式5-10来估算，于是，对固定-固定或固定-自由的约束条件来说，分别有

$$\epsilon_{\max} = \frac{\delta_{\max} 6d}{l^2} \quad \text{或} \quad \delta_{\max} 3d$$

例如，假定有一个经受图5-5中七段采石爆破的10Hz结构。相对位移最大值能直接从响应谱中读为0.25 mm (0.01 in.)。然后对203 mm (8 in.)厚、2.4 m (8 ft)高 (亦即 8×12 in) 的墙 ($d=4$) 来说，其弯曲张应变应当是

$$\frac{0.01(4)(3 \sim 6)}{(8 \times 12)^2} = 13 \text{ to } 26 \times 10^{-6} \text{ in./in.} = 13 \sim 26 \mu$$

然后，最大剪切应变 γ 应当是

$$\frac{0.01}{8 \times 12} = 104 \times 10^{-6} \text{ in./in.} = 104 \mu$$

这在第9、12章中将要讨论，诱发8 in. 厚的混凝土块破裂至少需要300 μ 张应变穿过灰缝。若地面运动的质点峰值速度为25.4 mm/s (1 in./sec)，上述计算的应变就会发生。

结构长度的影响

可能反相的激励不能用单自由度(SDF)模型来考虑，振幅不同也好，相位不同也好，它们可以在运动穿过结构时发生。这一节介绍在穿过一个自由响应结构时，振幅衰减和相位时间滞后的影响，用具有二个独立激励支架的二个自由度(TDF)模型计算。实测住宅结构对采矿和施工爆

破振动的响应，然后同地面质点峰值速度和用SDF与TDF系统计算的响应比较。

若波长同结构尺寸相比足够长（低相位角 $\phi \leq \pi/8$ ），整个结构一般往往在一个方向上运动，如图5-12所示。在这种情况下，用SDF模型表示整个结构可能是合理的。另一方面，若波长只是结构宽度的二倍（高相位角 ϕ/π ），结构两边就在相反的方向上运动，如图所示；那么，使用SDF模型好象是有问题的。

对于正弦波来说，结构两边的相位差可以表达为

$$\phi = 2\pi w R_2 / c_s \quad 5 \quad 12$$

其中， ϕ 是相位差（弧度） w 是地面运动频率（赫芝）， R_2 是结构两边之间距离，而 c_s 是剪切波传播速度。图5-13表示穿过的结构相位差、波频和波速之间的关系。图中结构两边之间的距离假设为10m（30ft.），这是美国典型的低层住宅结构。穿过结构的相位差 π 弧度，表示一边向上运动，而另一边向下运动，这是根据频率高、传播速度快的波（典型的岩石中近距离爆破），或频率低、传播速度慢的波（典型的很弱土中的波）预计的。

二支柱的TDF模型被5与70Hz之间适当频率的正弦波运动激励时的响应特性已经试验了（Todo和Dowding, 1984）。其结果表明：

1. 在高频，比如说大于20Hz时，TDF和SDF二个系统的质量响应没有重要差别，并且二个系统对不同波速和不同炮孔距离的响应变化很小。

2. 在接近结构固有频率的低频激励时，响应大大地增强，并且响应大小依赖于波速和炮孔距离。

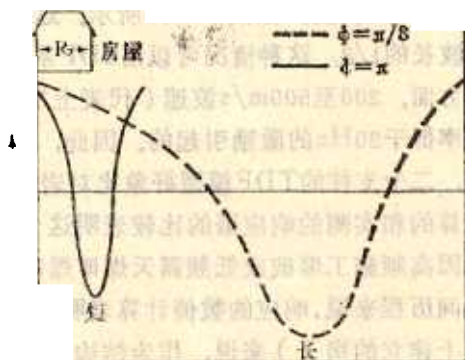


图5-12 波长与房屋尺寸的比较

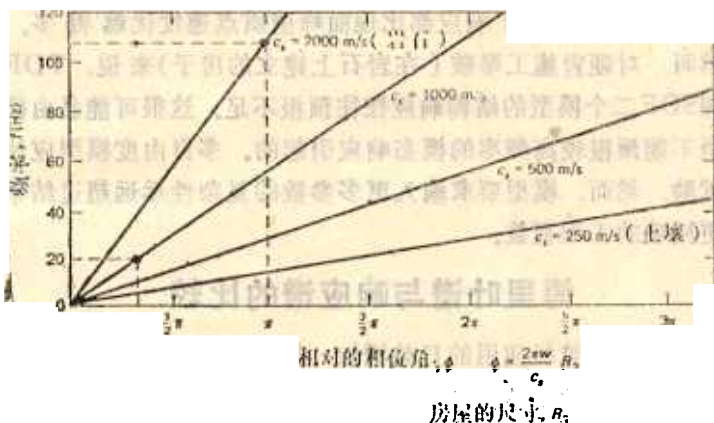


图5 3. 相位角随房屋尺寸和波长的变化

因此，对于典型的低层住宅结构来说，以大约20Hz频率异相激励，从工程观点看，是一个没有意义的问题。实际上，比较表明，用这样高频率的激励，并不能激励整个结构。在激励频率低于20Hz时，2000m/s波速(典型的岩石)

的相位差小于 $\pi/8$ 弧度，如图5—13所示。这意味着结构的尺寸小于波长的 $1/8$ ，这种情况可以用SDF系统适当地模拟。另一方面，200至500m/s波速（代表土壤）的 π 弧度相位差是频率低于20Hz的激励引起的。因此，在理论上，对土壤来说，二个支柱的TDF模型好象比对岩石更有意义，然而，计算的和实测的响应谱的比较表明这个差别是小的。

对于因高频施工爆破或低频露天煤矿爆破产生的实际地面运动时间历程来说，响应的数值计算表明，对煤矿爆破（在风化岩石上建立的房子）来说，作为结构响应的估算值，二个支柱的TDF模型只比SDF模型稍微好些。这一研究也表明，作为高频施工爆破和低频露天煤矿爆破的预报值，无论SDF响应还是TDF响应都比地面峰值质点速度优越得多。然而，对硬岩施工爆破（在岩石上建立的房子）来说，TDF和SDF二个模型的结构响应往往预报不足。这很可能是由模型不能预报较高频率的模态响应引起的。多自由度模型应该试验，然而，模型要求输入更多参数的复杂性远远超过结果更精确的工程利益。

傅里叶谱与响应谱的比较

随着计算机使用的日益增加，根据时间历程计算各种谱已变为常用的步骤。最常用的二种是傅里叶频谱和伪速度响应谱。虽然它们的含义和一般应用有本质的不同，但它们对无阻尼响应是相同的，那儿最大值运动发生在接近时间历程末。由于响应谱适合阻尼响应计算，其峰值通常发生在时间历程中央，因而二种谱通常是不同的。

由于二种谱的相似性，每一种都能用来确定地面运动的激励频率。然而只有伪速度响应谱能用来预报结构的响应。

下面的讨论是Hudson (1979)介绍的摘要。它论证谱为什么会相似,并包括一个与地震运动比较的例子。

式5—6能用来计算最大相对位移,从而计算的速度响应。为了比较,式5—13定义了傅里叶频率函数

$$F(p) = \int_0^t \ddot{u}(\tau) e^{-i p \tau} d\tau \\ = \int_0^t \ddot{u}(\tau) (\cos p\tau + i \sin p\tau) d\tau \quad (5-13)$$

于是,傅里叶幅值谱(FS)变为

$$FS = \left\{ \left[\int_0^t \ddot{u}(\tau) \cos p\tau d\tau \right]^2 + \left[\int_0^t \ddot{u}(\tau) \sin p\tau d\tau \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (5-14)$$

对无阻尼情况, $\beta=0$ 来说,单自由度系统的相对速度 $\dot{\delta}(t)$,在形式上同相对位移的式5—8相似,于是(Hudson, 1979),

$$\dot{\delta} \int_0^t (t) = \int_0^t \ddot{u}(\tau) \cos p(t-\tau) d\tau \quad (5-15)$$

一展开就变为

$$\dot{\delta}(t) = \left[\int_0^t \ddot{u}(\tau) \cos p\tau d\tau \right] \cos pt \\ - \left[\int_0^t \ddot{u}(\tau) \sin p\tau d\tau \right] \sin pt, \quad (5-16)$$

因此,在响应谱上标绘的 $\dot{\delta}(t)$ 的最小绝对值(在 $t_{max} < t$ 时发生)变为

$$\dot{\delta}(t)_{min} = \left\{ \left[\int_0^{t_{max}} \ddot{u}(\tau) \cos p\tau d\tau \right]^2 \right. \\ \left. + \left[\int_0^{t_{max}} \ddot{u}(\tau) \sin p\tau d\tau \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (5-17)$$

它的形式与式5—14相同。在图5—14中，地震的傅里叶谱与相应的响应谱图形的比较说明了这个相似性。

这个相对速度谱和伪速度谱是相似的，但不完全相同，然而，它们的相似性允许断定伪速度响应谱能用傅里叶幅值谱同样的方法确定主频成分。响应谱又有预报结构响应和激励运动的频率成分的优点。

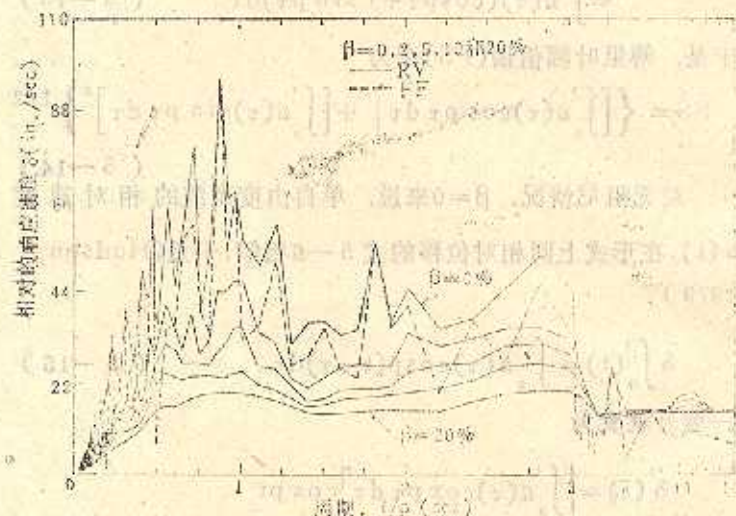


图5—14 1940年5月18日Imperial Valley地震的
相对速度 (RV) 谱和傅里叶谱 (FF)

实线—RV, 虚线—FF, $\beta = 0, 2, 5, 10, 20\%$

$\beta = 0, 2, 5, 10$ 和20%,

引自Hubson, 1975

译者注, 原文为B.