

地震工程和 土动力问题 译文集

〔美〕 I. M. 伊德里斯 等著

谢君斐 等译

地震出版社

地震工程和土动力问题译文集

〔美〕 I. M. Idriss 等著

谢 君 斐 等译

地 震 出 版 社

1 9 8 5

内 容 介 绍

这是从美国《地震工程和土动力学》会刊上选译的 16 篇文章。内容涉及强震特性分析,地面运动预测,反应分析方法探讨,土壤动力性能描述,结构-土壤-桩的相互作用(主要是海洋平台的抗震设计)等方面。其共同的特点是理论联系实际,对抗震设计具有指导作用。

前四篇是动态报告,对各该问题的研究作了全面的回顾,文末附有系统的参考文献。

本书可供科学研究者,抗震设计人员,大专院校土建、水利、抗震专业师生参考。

地震工程和土动力问题译文集

[美] I. M. Idriss 等著

谢君斐等译

责任编辑:宋炳忠

地 震 工 程 出 版

北京复兴路 63 号

北 京 印 刷 二 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

880×1168 1/32 17.5 印张 450 千字

1985 年 8 月北京第一版

1985 年 8 月北京第一次印刷

印数: 0001—2160

统一书号: 13180·229

定价: 4.00 元

目 录

1. 地震动特性 I. M. Idriss.....(1)
2. 土的应力-应变行为的本质 B. O. Hardin
..... (111)
3. 土壤动力性能的测定 R. D. Woods.....(203)
4. 土动力学的分析方法 J. Lysmer(286)
5. 基于地质迹象的设计地震运动
J. M. Bell, R. A. Hoffman.....(359)
6. 海上平台的抗震设计
V. V. Damodaran, Naiv(391)
7. 固定海上平台的抗震设计
海上平台小组..... (409)
8. 地震荷载下桩的侧向性能的模拟
H. Matlock, Stephen H. C. Foo, L. M.
Bryant(433)
9. 地下管道的地震反应
Michael O'Rouker, Leon R. L. Wang.....(449)
10. 1906年地震时查伯特坝的稳定性分析
F. I. Makdisi, H. B. Seed, I. M. Idriss
..... (459)
11. 排水对堆石坝地震稳定性的影响
K. Sadigh, I. M. Idriss, R. R. Youngs.....(478)
12. 土坝中动应力的简化确定

- J. L. Vrymoed, E. R. Calzascia.....(492)
13. 非均等固结压力条件下的孔隙水压力
W. D. L. Finn, K. W. Lee, C. H.
Maartman, R. Lo(503)
14. 海洋波浪荷载对软粘土性能的影响
J. T. Motherwell, S. G. Wright(515)
15. 砂、粉土和粘土的循环荷载性能
D. A. Sangrey, G. Castro, S. J. Poulos,
J. W. France(530)
16. 预估液化势的循环三轴和标准贯入试验
F. C. Townsend, W. F. Marcuson, J. P.
Mulilis(545)

地震动特性

I. M. Idriss

一、序 言

地震发生时，要从震源向各个方向射出地震波，这一点可由地震台仪器记录到的地震动来证明。这些仪器通常具备一定的特性，所以当地震波通过仪器所在的场地时，便能把由地震波产生的加速度、速度和位移的时程曲线记录下来。就加速度仪而言，一般可记录加速度的三个分量：两个正交的水平分量和一个竖向分量。例如图 1 中的记录就是 1971 年 2 月 9 日圣费尔南多地震中，在卡斯特克记录到的三个分量。

地震动极为复杂。对过去或今后的地震，估计其地震动的特征并给出主要地震动参数的数值，对工程应用来说是必不可少的。搞清地震动的特征和影响这些特征的因素在地震工程的各个领域都有重要意义。

本文旨在对确信（基于目前水平）具有工程意义的地震动参数的评价和定量方法的技术现状予以评述和总结。

对地震动参数赋以定量结果的现有技术状况，从根本上说主要还是根据经验的方法或者一种经验-解析的方法来处理。本文将主要的篇幅来讨论有关经验方法的现状；而对于经验-解析方法在这里只是简单地提一下。

另一点需要着重指出的是，本文所讨论的地震动参数的特性和定量问题，是指那些能在地震中记录到的地震动而言。这些参数虽然可以作为选择抗震设计参数的基础，但对抗震设计参数本身的讨论却超出本文的范围。

二、地震动参数

图 1 所示的地震动分量是用典型的模拟形式（即记录在照相纸或胶卷上）记录的，这类模拟式的记录在估算加速度峰值，和对频率成分及持续时间作某种一般的定性描述时可能有些用处，除此之外，就很难加以利用。因此通常需要把这种记录换成更有用的数字形式。数字化过程包括将加速度和时间座标读出来，然后对仪器、噪声和基线等进行校正（Trifunac 和 Lee, 1973），一旦完成这些校正工作，便可采用最后得到的加速度去计算地震动的参数，其中包括加速度、速度、位移、谱值、持续时间以及下面要讨论到的其他参数。

（一）加速度 a ，速度 v 和位移 d

图 2 的顶部给出了一条典型的，经过校正的加速度图，图中用小圈标出了加速度的峰值坐标。对此加速度图进行一次积分，就得到图 2 中部所示的地震动速度时程曲线，它的峰值也是用小圈标出的。图 2 的底部是一条位移的时程曲线，是对速度曲线积分后得到的。

仔细观察一下图 2 中的速度和位移的时程曲线，便可指出在时间 $t = 0$ 时，两条曲线都有一个有限的数值。这些初始的速度和位移值是在校正过程（Hudson 和 Brady, 1971）中确定的，在对加速度记录作校正积分以计算速度和位移的时程曲线时就要用到这些初始值。如果忽略这些初始值，就会在计算峰值速度和峰值位移时导致明显的误差。加州理工学院发行了一套强震记录的磁带和卷本^{*}，其中就列出了经该院数字化和校正过的每一条记

^{*} 从 1969 年 7 月开始，加州理工学院地震工程研究室发行了一套巨著。第一部份为卷 I，包括计算机打印和作图的未校正加速度记录（国内也称调整加速度记录——译者注）和它的曲线；第二部份为卷 II，包括校正后的加速度记录和积分得到的地震动速度与位移的时程曲线；第三部份和第四部份为卷 III 和卷 IV，分别包含反应谱和傅

录的初始值。但在使用由穿孔卡片给出的数字地震动记录时，应该注意这上面的记录并未经过加州理工学院的全部校正计算过程。应该指出，Mohraz 等人（1973）也提出过一个稍有不同但同样有效的方法对未校正的加速度同时进行基线校正，以计算得到相当于加州理工学院卷本中所提供的速度和位移。

加州理工学院目前采用的数字化和校正的方法已被广泛采用，在现有的全部数字地震动记录的穿孔卡片中，绝大部分也是利用这种方法得到的。据作者所知，美国地质调查局正在这方面作出努力，以期对整个数字化和校正过程进行审议和估计；这种努力有可能使这方面的工作有所改进和提高。

Hudson（1976）在加州理工学院报告的索引卷中，曾就该院发表的数字化记录中的一个重要方面，即涉及加速度峰值的问题指出：“在卷Ⅱ报告的标题中列出的加速度峰值是由时间间隔为0.02秒的等间距数据中挑出来的。对某些高频记录而言，这样的时间间隔还不足以确定原始加速度记录中的峰值。然而，卷Ⅰ中的数字化记录却包含了原始记录中的所有峰值，因为这时是在不等间隔的时基上进行数字化的，其目的是确定记录上的每一个重要特征……这种差别往往在竖向分量上最为显著，因为竖向分量通常具有高频成分……卷Ⅱ上的峰值速度和峰值位移不会遇到这种困难，因为在较低频率范围内，0.02秒的时间间隔已能十分精确地确定出峰值。”

就所选的一组加速度，将卷Ⅰ和卷Ⅱ峰值加速度之间的差别表示如下：图3和图4为水平分量，图5为竖向分量。对水平加速度峰值来说，卷Ⅰ中给出的值比起卷Ⅱ中的要大，在基岩上可大到30%，在坚硬土地地上可大到20%，平均起来要分别大12%

里叶振幅谱。另外还有索引卷，它是这部巨著的最后一卷，在该卷中列出了全部台站和记录的索引，并用表列出了卷Ⅰ和卷Ⅱ中的加速度峰值。

自1976年以来，美国地质调查局成为美国取得记录和处理记录的主要部门。其他政府部门和某些私人组织也参与了这方面的工作。

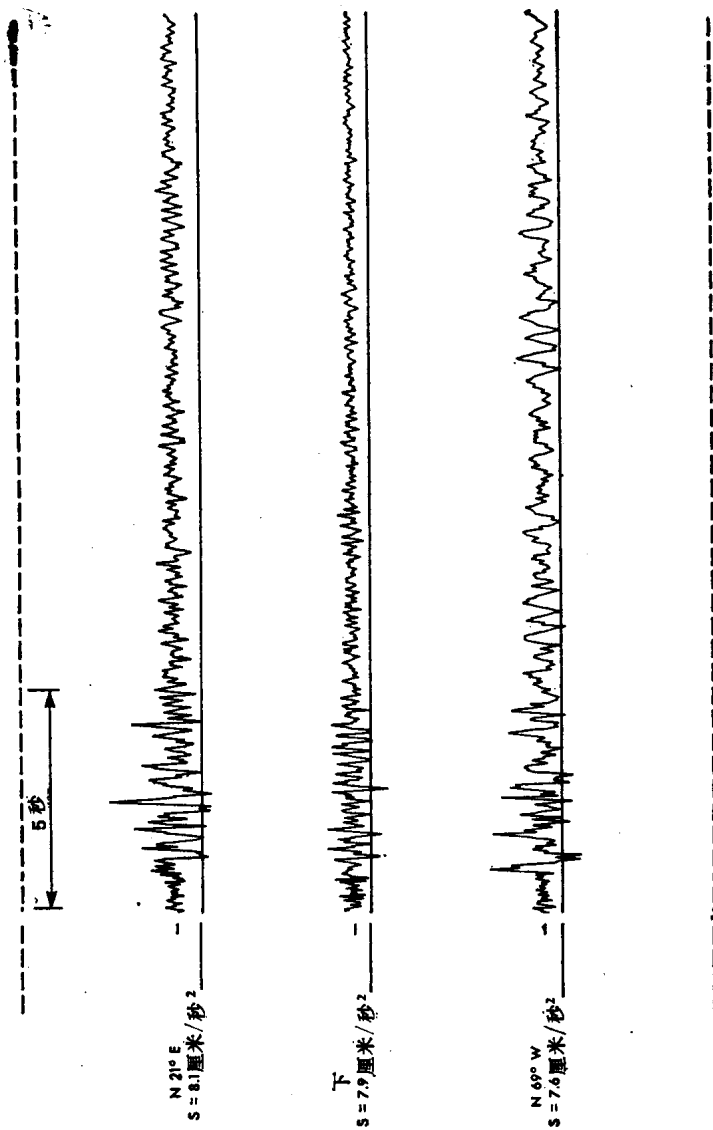


图 1 典型的加速度仪记录

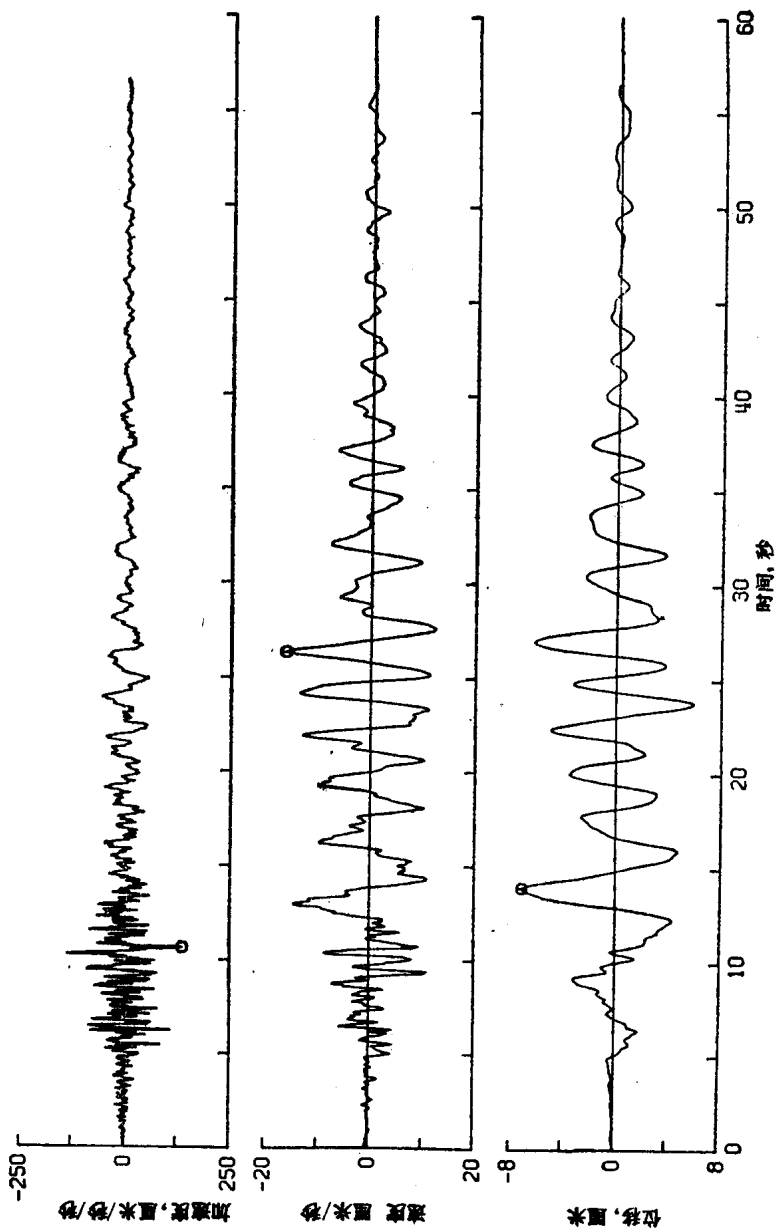


图 2 典型的经校正的加速度记录 and 积分得到的速度及位移的时程曲线

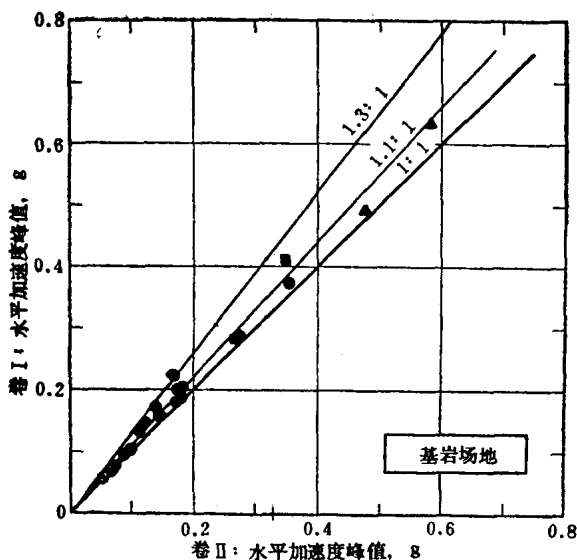


图3 对所选的一组加速度记录, 卷 I 和卷 II 中的水平加速度峰值的比较 (基岩场地)

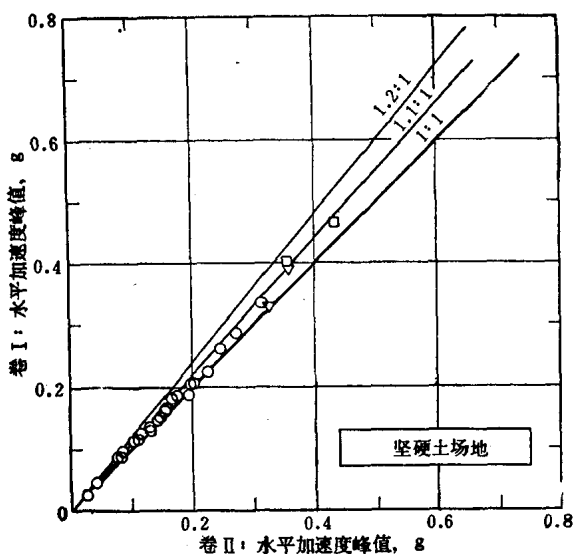


图4 对所选的一组加速度记录卷 I 和卷 II 的水平峰值加速度的比较 (坚硬土壤场地)

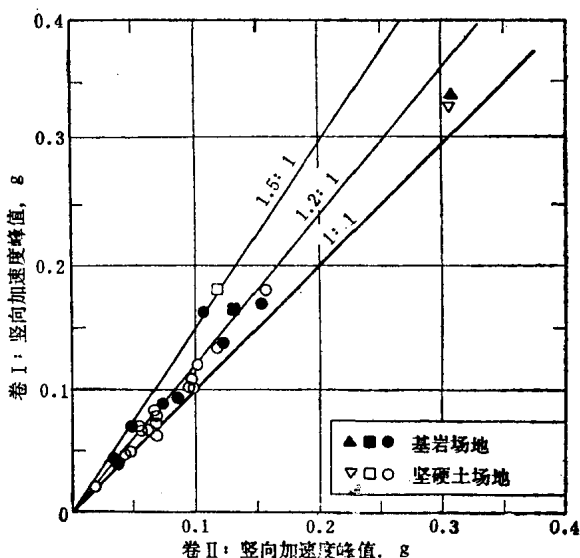


图5 对所选的一组加速度记录, 卷 I 和卷 II 的竖向峰值加速度的比较 (基岩和坚硬土壤场地)

和 8 %。另一方面, 就竖向加速度峰值来说, 不论在基岩或坚硬土层场地上, 卷 I 给出的值比卷 II 给出的值要大 50 %, 平均要大 20 % 左右。要指出的是, 现有的许多经验关系式 (见附录 A) 都是按卷 II 中的加速度峰值推出来的。

a, v 和 d 之间的关系 当介质中的一点随时间沿某方向运动时, 它的加速度、速度和位移峰值必须是一致的 (Newmark, 1968), Newmark 导出了峰值速度的上限和下限是和加速度及位移的峰值有关的, 并建议将这种方法用于验证测量值的精度和确定这些峰值。Newmark 得出结论, 认为在所有有重要实际意义的情况下, 存在 $v^2 \ll ad$, 他建议对地震动可采用下述范围: $ad/v^2 = 5 \sim 15$ 。

不难看出, 对一个重复的正弦运动来说, 比值 ad/v^2 等于 1。然而, 对地震动来说这个比值要随距离增大而减小, 且在相当大

的距离处,这个比值就趋于 1 (Newmark 和 Rosenbluth, 1971), 这是因为随着距离的增大, 运动便趋向于变得更为均匀的缘故。

在许多研究中还考察和使用了另一个比值 v/a 。两个比值 v/a 和 ad/v^2 还被用来确定谱的界值, 这将在本节的稍后处予以讨论。

(二) 谱 分 量

为了表征地震动性质, 反应谱的概念已被地震学家和工程师讨论和使用了数十年 (如: Benioff, 1934; Biot, 1941; Housner, 1941), 计算反应谱的理论也是相当简单和明确的。然而, 在实际上, 这种计算一开始是在一种机械的或电的分析器上完成的 (Biot, 1941; Housner 和 McCann, 1949), 这样的计算包含着大量的劳动。随着大容量高速数字计算机的发展, 谱值的计算已经成为一项常规的工作了。然而, 用户必须注意, 在反应谱的计算中目前已经研究和应用了许多计算方法。对于比 Δt 大 10—15 倍的长周期来说 (此处 Δt 为积分记录时采用的时间增量或步长), 采用现行的各种计算方法, 得到的结果实际上是一致的。然而对较短的周期来说, 不同的计算方法将对结果产生明显的影响。要详细了解这方面的情况, 读者可参阅 Hudson 等人 (1969) 的著作, 该文对有限差分、直接积分和快速傅里叶变换技术等主要 (目前仍在使用的) 计算方法进行了讨论。

有关反应谱的定义, 推导以及其他基本概念, 可以在某些著作中找到 (如: Housner, 1952b; Hudson, 1956 和由这些作者和其他作者在此后发表的许多著作), 这里不再赘述。为了参考方便, 在本文中多次使用了下列公式和符号。

对于无阻尼周期为 T 秒和阻尼比为 β 的单自由度系统, 它的绝对加速度峰值就定义为绝对加速度反应谱 $SA(T, \beta)$ 。它的相对速度峰值和相对位移峰值分别用 $SV(T, \beta)$ 和 $SD(T, \beta)$ 表示。

对一个正弦运动, 其位移可用 $u = A \sin \omega t$ 来描述, 其峰值位移为 $|u|_{\max} = A$ (式中 A 为任意常数)。它的速度和加速度可表示为:

$$\text{速度} \quad \dot{u} = A \omega \cos \omega t,$$

$$\text{加速度} \quad \ddot{u} = -A \omega^2 \sin \omega t.$$

因此, 它的速度峰值和加速度峰值可给出如下:

$$|\dot{u}|_{\max} = \omega A,$$

$$|\ddot{u}|_{\max} = \omega^2 A.$$

利用这种概念, 曾定义了拟反应谱值。因此, 若已知相对位移反应谱 $SD(T, \beta)$, 便可得到拟相对速度反应谱和拟绝对加速度反应谱如下:

$$PRSV(T, \beta) = \omega SD(T, \beta) = 2\pi/T SD(T, \beta),$$

$$PASA(T, \beta) = \omega^2 SD(T, \beta) = (2\pi/T)^2 SD(T, \beta),$$

$$PASA(T, \beta) = \omega PRSV(T, \beta) = (2\pi/T) PRSV(T, \beta).$$

上述诸式中, ω 为无阻尼圆频率, 且 $T = 2\pi/\omega$; PR 和 PA 分别规定为拟相对和拟绝对。不难证明, $PASA(T, \beta)$ 和 $SA(T, \beta)$ 几乎一致, 因此两者可以互换使用。可是 $PRSV(T, \beta)$ 和 $SV(T, \beta)$ 却可以相差甚殊, 这种差异和输入的加速度记录以及单自由度系统的周期和阻尼有关。

提出用拟相对速度来代替精确的相对速度是出于方便的考虑。因为在那个时候(四十年代后期和五十年代初期)反应谱的计算还是一个相当复杂的过程。目前任何一种量的计算都是一件十分平常的事了。然而拟相对速度仍能提供一种简便的方法, 把各种反应谱值表示在一张用双对数坐标表示的三联反应谱图上。在这种图上纵坐标(Y 轴)代表拟相对速度, 而横座标(X 轴)代表周期, 这时加速度和位移的反应谱值便不难分别表示在与 X 轴成 $\pm 45^\circ$ 的斜轴上。图 6 给出了一幅典型的三联反应谱图, 图中画出了与几种阻尼比相对应的反应谱曲线。除此以外, 还可以有多种表示反应谱值的其它方法, 如利用常用坐标图, 或单对数、双对

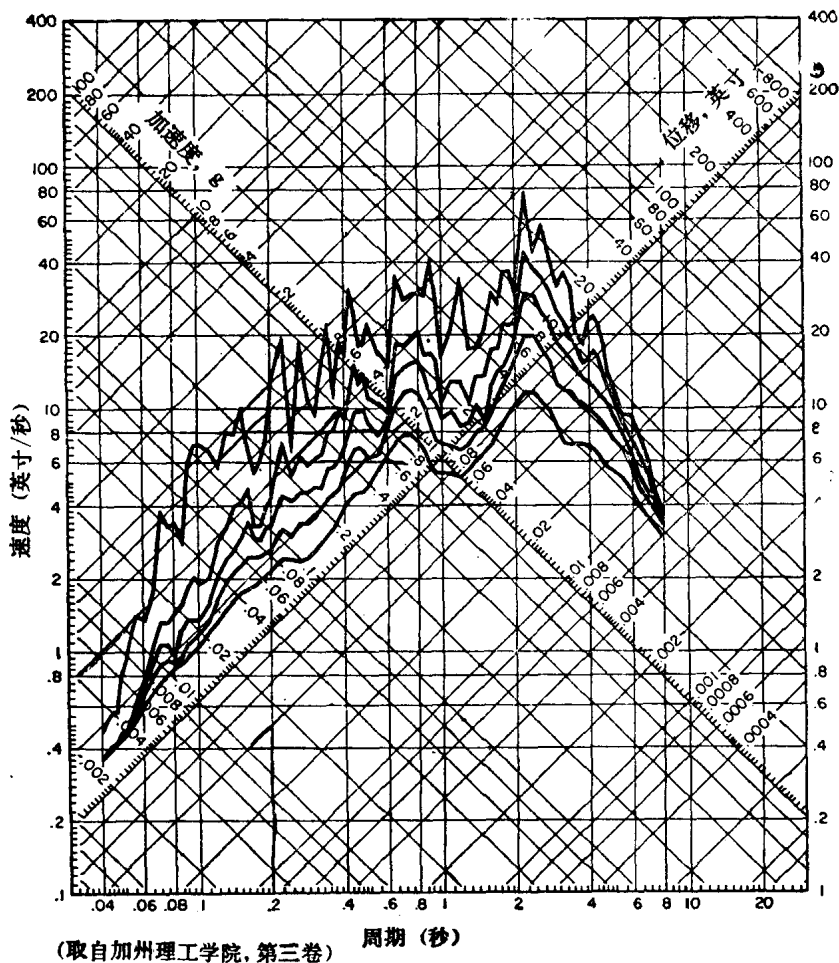


图 6 典型的三联反应谱曲线图

数坐标图给出的 SA 对 T , SV 对 T 和 SD 对 T 的曲线。也有人愿意采用以频率 f 替代周期 T 为横坐标的谱图, 此处 $f = 1/T$, 单位为周/秒。

前面曾经提到过卷Ⅱ中的等间距数据的时间间隔为0.02秒，因此会影响加速度的峰值，这种影响同样也会作用到短周期处的谱值上，图7示意地表示了这一点。

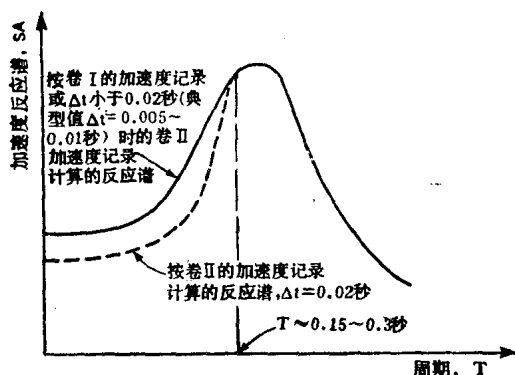


图7 采用卷Ⅱ加速度记录对反应谱值可能影响的示意图

标准反应谱的形状：根据任意一条运动记录算得的反应谱，都可以用任意一种地震动参数（如加速度，速度，位移或以后要讨论到的谱烈度）来标准化。

例如，有些研究（Hayashi等，1970；Blume等，1973；Seed等，1976a）中采用了经地震动加速度峰值标准化了的谱，也即采用了比值 SA/a ，称它为动力放大系数（DAF），或放大系数、增强系数等。另有一些研究（即Mohraz等，1973；Mohraz，1976），在特定的周期范围内采用了由地震动加速度，速度和位移的峰值标准化了的谱，即 SA/a ， $PRSV/V$ ， SD/d 。

采用标准化的谱曲线，便于估算一张特定的加速度图或一组加速度图的相对频率分量。它也同样为研究广义反应谱的形状提供了一种方法，这种广义反应谱只需要一个附加的参数（加速度峰值）便可推得作为设计基础用的反应谱值。

谱的界值：曾经用比值 V/a 和 ad/V^2 按两个转移频率（或

周期) 去确定谱的界值。所谓转移频率(周期)是指如图 8 所示的能把加速度、速度和位移分隔开来的频率(周期)。转移周期 T_1 和 T_2 与 V/a , ad/V^2 有如下关系:

$$T_1 \propto V/a$$

和
$$T_2/T_1 \propto ad/V^2.$$

这些概念由 Newmark 和 Hall (1969) 提出并被 Mohraz 等

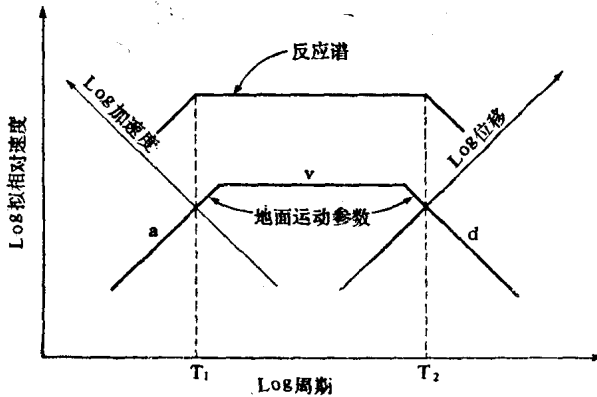


图 8 反应谱曲线上的转移周期 T_1 和 T_2 的示意图 (三联的双对数图)

(1973) Mohraz (1976) 和 Der-Kiureghian 和 Ang (1977) 用以构成广义标准反应谱。

谱烈度: Housner (1952b) 把在周期 0.1 秒到 2.5 秒之间的速度反应谱曲线下的面积定义为加速度图的谱烈度, 因此谱烈度 SI 可以给出为

$$SI(\beta) = \int_{0.1}^{2.5} SV(T, \beta) dT, \quad (1)$$

它是阻尼比的函数。Housner (1959) 把谱烈度用作进行标准化的参数, 还利用在四个场地上记录到的加速度图作为基础, 提出