

# 建筑科学研究报告

REPORT OF BUILDING RESEARCH

1983

No. 16

## 多层场地土分类与抗震设计反应谱

The Classification of Site Strata and Response  
Spectra for Aseismic Design

中国建筑科学研究院

CHINA ACADEMY OF BUILDING RESEARCH

## 提 要

本报告评述了国内外与复盖层厚度和柱状特性有关的震害现象。并对这些现象作了比较深入的研究，首先根据现有的资料对影响地面运动谱特性的各种因素作了一般的分析。然后从实际地层的大量钻孔和波速测试资料出发，用统计方法总结了剪切波速随深度变化的规律，分析了场地土厚度与土层卓越周期的关系。研究表明层状土的卓越周期主要决定于复盖层的厚度，认为后者是场地分类中应当考虑的重要因素。为了解决在实际工程应用中确定复盖层厚度的难题，还研究了表层平均波速与复盖层厚度的关系，提出了在资料不足的情况下如何进行场地分类的合理方法。根据实际记录到的不同场地土上的反应谱资料研究了场地条件对谱形状和峰加速度的影响，并在此基础上提出了一个新的场地分类方案。文中还进一步指出除了场地条件以外，烈度、震级或震中距对强震地面运动特性也有重要影响。为此根据我国历史地震等震线的衰减规律建立了烈度、震级和震中距之间的经验关系，并将设计烈度按照不同的震中距分为七度远、中、近，八度中、近和九度六种情况。根据实际强震观测资料的统计和在六种基岩运动下对各种可能的地层剖面进行的地震反应分析，按反应谱的形状进行分类，进一步提出了规格化加速度反应谱（ $\beta$ 谱）按不同烈度，震中距和场地类型进行分类的新方法。此外，还对设计地震系数提出了相应的调整方法。文中的结果不论是对实际结构的抗震设计和规范修订都具有参考价值。

# The Classification of Site strata and Response Spectra for Aseismic Design

Institute of Earthquake Engineering  
Zhou Xiyuan, Wang Guangjun, Su Jingyu

## ABSTRACT

This report firstly surveys some earthquake damage phenomena related to thickness and profile of soil layers at home and abroad. In order to investigate these site-dependent seismic damage in profundity, various factors which describe the spectrum characteristics of strong ground motion have been generally analysed on the basis of available information. By the use of large number of S-wave-testing data obtained from practical job sites, the variation patterns of S-wave with depth down to bedrock and the relationship between thickness and predominant period of site strata have been summed up statistically. It has been shown that the predominant period of site strata mainly depends on the overburden thickness which should be considered as an important factor in site classification. It is sometimes uneasy to determine overburden thickness when the geological data of a practical site are insufficient. Taking such situation into consideration a credible classification method has been proposed. Furthermore, it has been shown that intensity, magnitude or epicentral distance also have important effect on spectral characteristics of strong ground motion besides site condition. From the statistical analysis of attenuation law of isoseismals in Chinese history, the empirical relationship among intensity, magnitude and epicentral distance has been set up. The design intensities 7 and 8 have been subdivided into 3 and 2 groups respectively according to different epicentral distance. Based on statistical analyses of strong ground motion records and results of seismic response analysis of typical site strata subjected to six kinds of bedrock motions, which correspond to different intensities and epicentral distances, a new classification of normalized spectra depending on intensity, epicentral distance and site condition is presented. In addition, the corresponding modification of seismic design coefficient has also been suggested. The results in this report are valuable for practical structural aseismic designs as well as for revision of seismic design codes.

## 目 录

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| 前 言                     | ( 1 )  |
| 一、与场地条件和震级、震中距有关的某些震害现象 | ( 1 )  |
| 二、影响地震动谱特性的诸因素          | ( 3 )  |
| 三、层状地基剪切波速和其它动力参数的统计分析  | ( 5 )  |
| 四、多层土地震反应分析的方法和输入波      | ( 9 )  |
| 五、计算结果                  | ( 17 ) |
| 六、层状场地土分类               | ( 30 ) |
| 七、场地影响                  | ( 35 ) |
| 八、设计反应谱的分类              | ( 37 ) |
| 结 语                     | ( 42 ) |
| 参考文献                    |        |

# 多层场地土分类与抗震设计反应谱

中国建筑科学研究院 工程抗震研究所 周锡元 王广军 苏经宇

## 前 言

场地条件对震害的影响已为多次大地震震害调查、理论分析结果和强震观测资料所证实(1)。因此自七十年代以来,世界上愈来愈多的地震国家采用按场地土分类的平均反应谱做为抗震设计的依据,只是各国间场地土类别的划分并不一致。目前,场地土分类大多按土层一般描述、岩性和厚度、岩性和土力学指标以及地面脉动卓越周期、波速(纵波,横波)、标贯击数值、地下水位等标准进行划分。我国TJ11—74《工业与民用建筑抗震设计规范》是按单一土层岩性的一般描述对设计反应谱进行分类的;对多层土的评价只是在编制说明中根据经验提供了一种参考方法。1967年在划分北京城区的场地类别时曾采用10米以内倒三角形和倒梯形加权平均的方法确定多层土的场地类别。近年来,刘曾武、徐耀庭等在用平均剪切模量进行小区域划分时,也使用了按厚度和深度加权平均的方法。可以认为,上述方法对估价层状场地对一般刚性结构的影响是有一定根据的,使用起来也很方便。但是由于资料来源的局限性和缺乏应有的理论根据,因此有必要作进一步的研究和实践检验。

近些年来,国内外都积累了一些强震观测点的详细地质和层状地基分层剪切波速资料;此外由于电子计算技术的发展,多层场地土的地震反应计算已成为可能,这些条件是进一步研究场地分类的基础。本文依据宏观震害现象、层状地基勘察资料,多层土地震反应分析的结果,提出一种按地震效应进行场地土分类的方法;研究了在确定设计地震系数和规格化反应谱( $\beta$ 谱)时如何综合考虑烈度、震中距和场地条件的影响,提出一种供修订抗震规范作参考的新分类方法。

## 一、与场地条件和震级、震中距有关的震害现象

复盖层厚度不同时的震害差异现象很早就引起了注意。1923年关东大地震时,东京都木结构房屋的破坏率明显地随冲积层厚度增大而增高。1957年旧金山地震时,据Seed和Idriss估计软弱和厚土上的高建筑物比硬土上的反应大3~4倍。1957年墨西哥地震时,远离震中220哩的墨西哥城,厚淤泥质土上的高层建筑遭到严重破坏。1967年委内瑞拉地震

- 符圣耀、王志明,江静贝,李福民,李中锡等同志曾参加本专题的部分工作。本报告中所用人工地震波系陈永祁同志计算的。



震害调查的结果表明，加拉加斯市不同层数的楼房，在不同厚度土层H上的破坏百分比各不相同，例如：

层数 $N > 14$ ， $H > 200$ 米，破坏率80%；

层数 $N = 10 \sim 14$ ， $H \leq 200$ 米，破坏率30%；

层数 $N = 5 \sim 9$ ，破坏率10%。

1967年苏联塔什干地震时，远离震中距400哩的阿拉木图城，厚土层上的一些建筑物出人意料地遭到破坏。1967年土耳其默杜努谷地震时，阿达帕扎里城厚土层上的高层钢筋混凝土建筑物不是全部倒塌就是严重破坏。1970年土耳其格迪兹地震时，离震中135公里的菲亚特——托法斯汽车厂新建在140米厚冲积层上的单层厂房全部倒塌。此外1968年，1970年菲律宾马尼拉地震也提供了不同高层建筑物的破坏率随冲积层厚度变化的明显实例。

国内在1962年广东河源地震时，位于珠江沿岸厚淤积土或人工填土上的建筑物，其震害比市区东北部第三纪丘陵地带严重。1975年海城地震时，营口市和盘锦地区高大砖烟囱的破坏程度与海城县和大石桥相当；而海城县、大石桥的一般砖房屋的震害都远较营口市、盘锦地区严重[51]。进一步分析发现，这种现象与该两地区不同的震中距和复盖层厚有关。1976年龙陵地震震害调查表明，镇安盆地内的烈度高于周围地区。其中盆地周围花岗岩地基上房屋倒塌率不超过30%，而盆地内房屋倒塌率一般为50%左右，最高达70%。地质资料表明，盆地内为厚200米以上新生代地层。1976年唐山地震时，极震区内422水泥厂、唐山钢厂、建筑陶瓷厂房屋倒塌率为50%，而其它地方都达90%以上，其原因在于这些地方复盖层较薄。此外，从迁西县三屯营公社的赵庄子沿山沟往里到纪庄子，复盖层由厚变薄，其震害程度也逐步减轻。

七十年代以来，国内的一些震害调查工作开始重视下卧土层的组成对不同震害程度的影响。1970年通海地震时，10度区的王家庙、观音寺、张家营三村，均位于曲江超河漫一级阶地上，地形平坦，三村相距很近，钻孔查明3.6~7.5米以下的地层基本一致，但上部土却明显不同。王家庙位于洪积扇前缘，地表为洪积型亚粘土夹碎石，观音寺和张家营地基土同属漫滩相堆积，但观音寺表层填土以下为厚1米亚粘土，张家营表层填土以下为软弱的淤泥亚粘土。震害结果表明，王家庙震害较轻，张家营破坏较重，三村差异很大。1975年海城地震时，海城县于官屯村内两个地点的震害程度差别也相当大，震害指数分别为0.20和0.96。钻孔和剪切波速测定结果表明，两个地点的层状土构成有明显不同。此外这次地震时顾家窝棚、东拉拉房、革家窝棚与其周围地区震害差异也很大。钻孔资料对比结果表明，前者在地表下几十米内几乎全为粘土或亚粘土层，基本上不存在可液化的粉细沙层；而其周围地区地表下十几米内，几乎大都有较厚的饱和粉细沙层。这次地震中对田庄台某村及村外周围地区震害调查表明，在其它地区都产生喷沙冒水情况下，村内并没有出现这种现象。钻探结果表明，村内有较厚的人工填土表层。1976年唐山地震时，天津市A区比B区震害严重。现场勘测和理论分析结果表明，在大致相同的地质条件下，在B区地基内10米左右处，存在有低剪切波速的淤泥质亚粘土软弱夹层，故B区震害远低于A区[2]。此外，河北省玉田县在1976年唐山地震及1679年三河平谷地震时都表现为低烈度异常区。从场地土影响来看，中间夹有多层粘土的深厚中密砂可能起到某些减震作用。通

过上述现象,我们可得出这样的印象,即不同场地上的震害程度与地震动强度、震级大小和震中距,场地土覆盖层厚度,刚度变化规律有密切关系。但是至今还没有找到一种统一的模式来解释各种震害现象。本项研究的目的是希望通过多途径的综合研究寻找一种能够反映现象基本趋势的相对合理的场地土和设计反应谱分类方法。

## 二、影响地震动谱特性的诸因素

强震地面运动的谱特性决定于许多因素,如震源机制,传播途径特性,地震波的反射、折射,通路和聚焦以及局部地质和土质条件。Hudson和udwadia(3)分析了美国一些台站上的强震记录,认为没有单一的主要因素决定特定地震和场地的谱特性。例如1971年2月9日 San Fernando地震中两个台站上的平滑化富里哀谱,其中一个台站距震中29公里,位于冲积层上;另一个距震中34公里,位于花岗岩上。两台都位于同一方位上,相距6公里、震源机制都相同,传播途径也差不多,谱特性却有很大差别,特别值得注意的是单就谱特性来看很难决定哪个在冲积层上,哪个在基岩上。Trifunac和udwadia(4)分析了洛杉矶市六个台站在几次地震中的加速度记录,指出这个地区的地震动谱特性主要决定于震源机制和震源距,局部场地条件在修正地面运动方面只起很小的作用。udwadia和Trifunac(5)还分析了El centro台站上的15次地震记录,也得出了同样的结论。并发现震中方位对谱特性有相当大的影响。

土田肇等人(6)将港湾技术研究所所属42个台站上的222条水平分量反应谱进行了分类统计。他们将有两个以上记录的台站上的反应谱作了比较,结果发现同一台站上在各次不同震级和方位的地震中记录到的反应谱形状一致性较好的有11个,有相当离散的9个,非常离散的2个。由此可以大致看出场地条件和其它因素对反应谱形状影响的不同程度。

E. Kuribayashi(7)等利用44个5级以上强震记录研究了震级、最大地面加速度、震中距和地基土质条件对加速度反应谱的影响。结果表明在长周期范围内大震级、远震中距和软弱冲积层的谱值均偏大,其中震级影响最大(见图1),震中距和场地条件次之(见图2、图3),峰加速度最小。

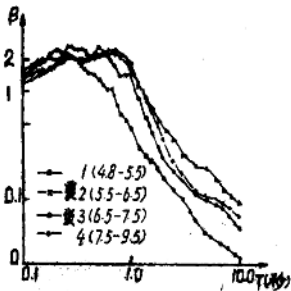


图1 震级的影响

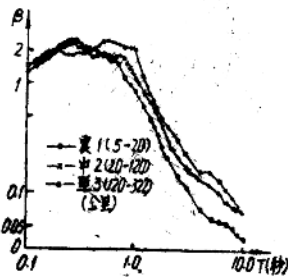


图2 震中距的影响

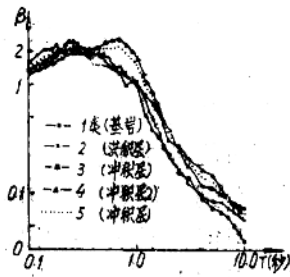


图3 土质条件的影响

陈达生(8)在分析上述诸因素的影响时,曾指出在讨论震级或震中距的影响时应该使其它条件保持不变。但是当讨论震中距的影响时,如若使震级保持不变、烈度或峰加速度

势必随震中距增大而变小，反之若使烈度或峰加速度保持不变，震级将随震中距增大而增大。由于目前的抗震设计是以烈度为基础的，所以我们偏向于在保持烈度或峰加速度基本不变的前提下来讨论震中距的影响。值得注意的是图1中大震级 ( $M=7.5\sim7.9$ ) 的平均谱相应于较远的震中距 ( $R=176$ 公里)，而小震级 ( $M=4.8\sim5.5$ ) 的平均谱则相应于较近的震中距 ( $R=40$ 公里)。同样在图2中远震中距 ( $R=120\sim322$ 公里) 的平均谱相应于大震级 ( $M=7.0$ )，而近震中距 ( $R=5\sim20$ 公里) 的平均谱相应于小震级 ( $M=5.6$ )。从这一意义上讲图1、2中大震级和远震中距，小震级和近震中距的搭配可以说是一种巧合，因为这样造成的地震动强度的差别相对于相反的搭配要小得多。

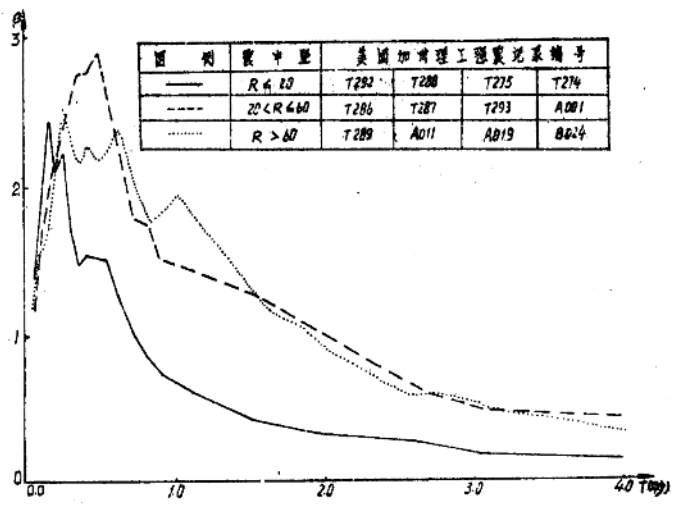


图4 埃尔申屈台站平均反应谱

为了考察震中距对地面运动反应谱的影响，我们对美国加州 El centro 台站上的加速度反应谱作了初步分析。该台站位于很厚的冲积层上，按现行规范属于Ⅲ类场地。我们将这个台站上的主要记录按震中距分为三类，计算了平均反应谱，结果示如图4中。从图中可以看出，当震中距大于20公里时，标准化加速度反应谱在长周期段的值明显地加大，而震中距  $20 < R < 60$  公里时的谱形状与  $R < 60$  公里时的情况并无多大差异。考虑到这种情况，我们又以震中距30公里为界进行统计计算，所得平均反应谱和加、减一倍方差的谱形状示于图5。

限于加速度记录的数量，不可能将峰加速度分为若干档分别来讨论震中距的影响，只能在不分峰加速度大小的条件下来讨论震中距对反应谱的影响。从以上分析来看，震中距对反应谱形状的影响是值得重视的，当

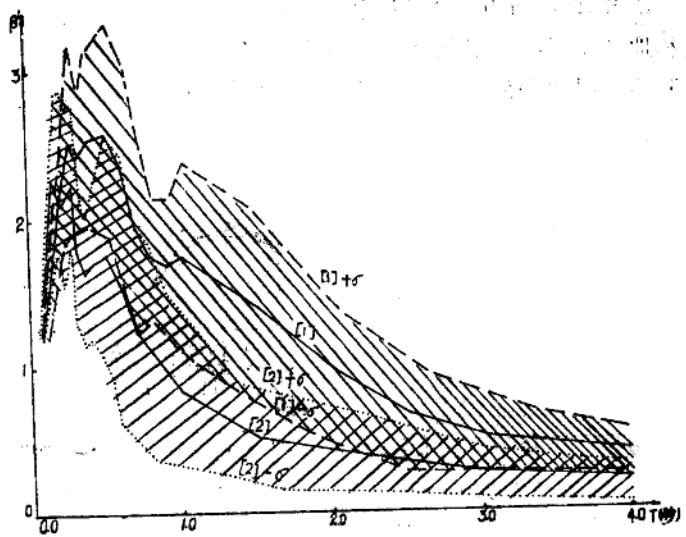


图5  $R=30$  公里时的平均反应谱及方差  
(1)——震中距 $<30$ 公里平均谱；(2)——震中距 $<30$ 公里平均谱



然这只是从一个台站上的某些记录中得出的结论。

### 三、层状地基剪切波速和其它动力参数的统计分析

近年来，在有关场地因素分析中，往往应用到层状地基的动力性质，其中剪切波速( $V_s$ )作为地基动力性质评价在工程应用中占有重要的地位。这不仅是因为它与地基的强度、变形模量等诸常数间有着密切的关系(例如标贯击数值 $N$ ，横向地基系数 $K$ ，单轴压缩强度等)，而且也在于它可用较简便的仪器和方法测得。利用已有钻孔和分层剪切波速资料进行统计，以便从中找出某些有普遍意义的规律，看来是很必要的。为此本文收集国内外文献142个钻孔及分层剪切波速数据，其中包括美国钻孔18个，日本钻孔60个，国内钻孔64个(主要是北京、上海、天津、河北、辽宁及云南等省市的钻孔)。钻孔最深达371米，浅的只有4.4米。

#### (一)不同土类剪切波速的变化范围

层状地基是由各种类别土层所构成的，由于沉积环境不同，即使是同一种类型土，其物理力学指标有时也明显不同。事实上同类土的剪切波速并不是一个固定值，而是一个在某一范围内变化的量。至于不同类型的土，则更有明显不同。对于具体的工程场地，其分层波速需通过现场勘察测出，但是当缺乏必要的测试手段时，也可根据同类土的实测资料来确定波速的变化范围。为此我们收集了国内的一些实测资料，并与国外相应资料对比后，给出不同土的剪切波速范围(适用于深度小于10米的情况)如表1所示。

不同土质剪切波速范围 表 1

| 土壤类别          | 回填土<br>表土 | 淤泥和<br>泥质土 | 软粘土    | 硬粘土     | 坚硬粘土    | 粉细砂     | 中粗砂     | 砾砂粗砂    | 砾卵石<br>碎石 | 岩石<br>石 | 风化岩 | 岩石   |
|---------------|-----------|------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|---------|-----|------|
| 剪切波速<br>(米/秒) | 90~220    | 100~170    | 90~170 | 120~190 | 170~240 | 100~200 | 160~250 | 240~350 | 300~400   | 350~500 |     | >500 |

#### (二)剪切波速沿深度变化的规律

由于是剪切波速是一个重要的土动力参数，而场地土在地震作用下的动态反应主要决定于剪切波速随深度的变化规律；因此研究它在正常沉积环境下随深度的变化规律无疑是有重要意义的。

考虑到浅层土特性的变化一般大于深层，资料(9)采用图6所示的分层厚度来估计实际场地中波速随深度变化的特征。根据142个钻孔实测资料，大致可划分为图7所示的几种波速随深度变化的类型。其中A~F代表20米以上的土层，G、H代表20米以下的土层。表2给出各种类型土层的实际个数。从表中可见，A、AG、EG型占绝大多数，其它类型所占比例相对较少。剪切波速可按如下式进行统计：

$$V_s = ah^b \qquad \dots\dots (1)$$

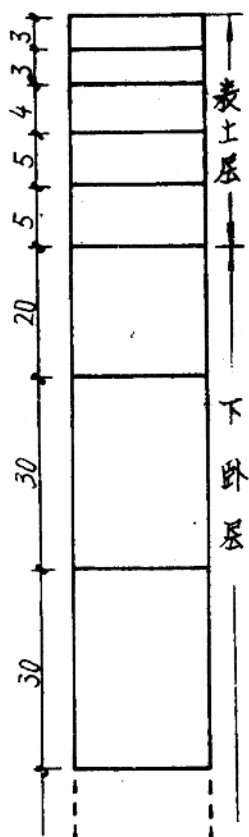


图 6 柱状各分层划分

式中,  $h$  为深度, 以米计;  $a$ ,  $b$  分别为回归系数。结果得到如下经验公式:

$$V_s = 124.5h^{0.287} \quad \dots\dots (2)$$

该式相关系数为 0.99。

各 剪 切 波 速 变 化 类 型 统 计

表 2

| 序<br>号 | 复盖层厚度*<br>(米)     | 钻 孔 类 型 |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 总<br>数 | 百分比<br>(%) |
|--------|-------------------|---------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--------|------------|
|        |                   | A       | C | AC | BG | CG | DG | EG | FG | AH | BH | EH |        |            |
| 1      | $0 < H \leq 10$   | 8       |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 8      | 5.6        |
| 2      | $10 < H \leq 20$  | 8       | 4 |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 12     | 8.4        |
| 3      | $20 < H \leq 40$  |         |   | 20 | 3  | 1  | 4  | 6  |    | 2  | 1  |    | 37     | 26.0       |
| 4      | $40 < H \leq 70$  |         |   | 25 | 4  | 1  | 6  | 6  |    | 3  | 1  |    | 46     | 32.4       |
| 5      | $70 < H \leq 100$ |         |   | 12 | 2  | 1  | 1  | 4  |    | 3  |    |    | 24     | 16.9       |
| 6      | $H > 100$         |         |   | 8  | 3  |    |    | 1  | 1  | 2  |    | 1  | 15     | 10.6       |
|        | 总 和               | 16      | 4 | 65 | 12 | 3  | 11 | 17 | 1  | 10 | 2  | 1  | 142    | 110        |

\* 这里的复盖层厚度系指基岩以上的土层厚度。

为考查不同复盖厚度对波速随深度变化的影响，将表2中六种情况的 A、AG 类型加以统计，其结果如表 3 和图 8 所示。由图可见，剪切波速随深度变化规律明显地与土层复盖

不同复盖厚度时  $V_s-h$  统计公式 表 3

| 复盖厚度<br>(米) | $0 < h \leq 10$        | $10 < h \leq 20$       | $20 < h \leq 40$       | $40 < h \leq 70$       | $70 < h \leq 100$     | $h < 100$             |
|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 公 式         | $V_s = 245.4h^{0.215}$ | $V_s = 128.8h^{0.351}$ | $V_s = 142.2h^{0.234}$ | $V_s = 107.4h^{0.339}$ | $V_s = 92.3h^{0.333}$ | $V_s = 77.0h^{0.351}$ |
| 相 关 系 数     | 0.99                   | 0.95                   | 0.94                   | 0.97                   | 0.98                  | 0.98                  |

厚度有关。在资料〔9〕中曾对以上钻孔的波速随深度变化的资料进行过  $V_s$  与土层深度，复盖层厚度对数值的复相关分析。

此外，还对北京市勘察处和原建研院勘察技术研究所分别在徐州和烟台等地 134 个钻孔的波速测试资料进行复相关分析。结果得到以下公式：

$$V_s = \frac{242.5(h+1)^{0.291}}{H^{0.217}} \dots\dots (3)$$

式中， $h$  和  $H$  分别为土层深度和复盖层厚度，以米为单位。在以上分析中，我们对资料〔9〕的式子作了一点小修改即在深度  $h$  上加了一个常量，目的是使地表面波速不等于零。(3) 式中的系数与资料〔9〕中的结果是比较接近的，但相关系数减为 0.56,  $\sigma_{100V_s} = 0.43$ 。

(三) 剪切波速与 N 值的统计关系

标准贯入锤击数  $N$ ，不但在判断地基力学性质方面具有较大的实用价值；而且已有的研究表明，层状土的剪切波速  $V_s$  与  $N_{63.5}$  也有较密切的关系。本文收集表 4 中各研究成果重新按砂类土、粘性土以及不考虑土质差别，加以回归分析其结果为：

$V_s = 120N^{0.276}$ 
 $r = 0.99 \text{ (粘性土)}$ 
 $\dots\dots (4)$

$V_s = 116N^{0.256}$ 
 $r = 0.98 \text{ (不分类)}$ 
 $\dots\dots (5)$

$V_s = 86N^{0.341}$ 
 $r = 0.99 \text{ (砂类土)}$ 
 $\dots\dots (6)$

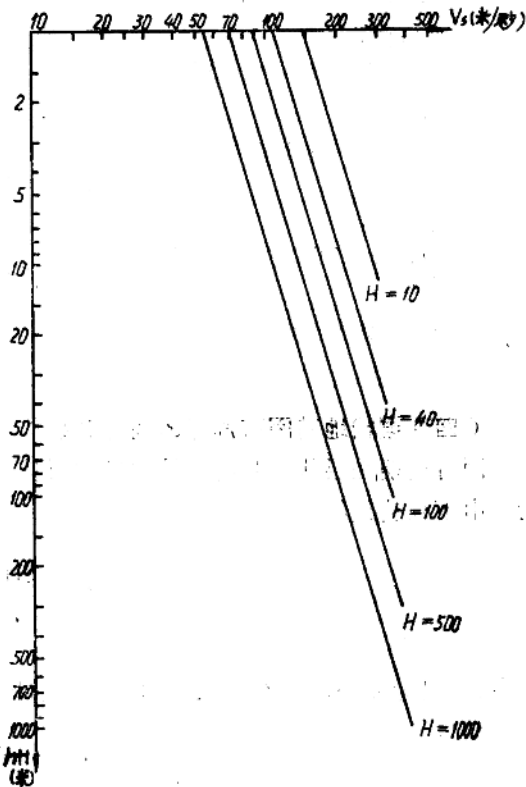


图 8 不同复盖厚度时  $V_s$  随深度变化的关系

$V_s$  与  $N$  值的经验公式

表 4

| 序号 | 资料来源                          | 经验公式                                                                                                | 适用范围                               |
|----|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 1  | 今井常雄:<br>动的性质に関する試験           | $V_s = 102 N^{0.222}$<br>$V_s = 80.6 N^{0.333}$<br>$V_s = 114 N^{0.224}$<br>$V_s = 97.2 N^{0.0000}$ | 冲积粘性土<br>冲积砂类土<br>洪积粘性土<br>洪积砂类土   |
| 2  | 田治米辰雄等:<br>地盘上震害              | $V_s = 104 N^{0.323}$                                                                               |                                    |
| 3  | 今井常雄等:<br>冲积层のS波速と土质特性        | $V_s = 85.2 N^{0.333}$                                                                              | 冲积砂层                               |
| 4  | 董津城等:<br>北京市区地质概况和土动力性质       | $V_s = 85.9 N^{0.344}$                                                                              | 砂类土                                |
| 5  | 冯广弟:<br>下辽河平原场地分类方案           | $V_s = 120.2 N^{0.310}$<br>$V_s = 181.9 N^{1.100}$<br>$V_s = 69.1 N^{0.400}$                        | <15米粘性土<br>>15米粘性土砂类土              |
| 6  | 张守华等:<br>用几种方法原位量测土的动力性质及统计分析 | $V_s = \frac{N}{0.0056 N + 0.0042}$                                                                 |                                    |
| 7  | 日本公路桥梁抗震设计新规程                 | $V_s = 100 N^{0.333}$<br>$V_s = 80 N^{0.333}$                                                       | 粘性土( $N < 25$ )<br>砂类土( $N < 50$ ) |

#### (四) 层状地基固有周期的统计关系

固有周期是层状地基动力性质最重要特征之一，其值通常可按金井清的重复反射理论，由下列公式给出：

$$T = \frac{4H_{\text{复}}}{\bar{V}_s} \quad \dots\dots (7)$$

式中， $\bar{V}_s$  为复盖层厚在卓越周期意义上的折算剪切波速，按下式确定：

$$\bar{V}_s = \frac{H_{\text{复}}}{\sum_i \frac{h_i}{V_{s_i}}} \quad \dots\dots (8)$$

式中， $h_i$  和  $V_{s_i}$  分别为各分层的厚度和剪切波速值。

在考虑场地分类时土层的影响是一个复杂的问题。从工程实用的观点应规定一个影响深度，例如10米或20米，以便按照这一深度范围内的土层特性对土层的周期特性进行分类。但是不论从宏观震害现象和理论分析结果来看，都没有充分根据来规定10米或20米的深度界限。从上面的土层剖面统计结果中，我们发现土层的刚度通常是随深度增加而增加的，只是在特殊的沉积环境下才有明显地软硬夹层。所谓基岩是指某个深度以下的刚性地

层。从SH波在分层土中的传播和反射理论，当下卧层的刚度比它上面的土层大得多时，土层的滤波作用决定于这个刚性地层以上土层的重复反射。因此可将它看做基岩，并将基岩以上的土层称为复盖层。另一方面层状场地土对于不同波长的地震波的滤波特性是不同的，一般浅层地质主要影响短周期的波，而深层地质则影响长周期的波。Trifunac[10]认为在对工程有影响的地震波频率范围内应该考虑0~2公里的复盖层的厚度。

由于规范中考虑结构的周期一般都不很长，所以我们着重考虑上部土层的影响。鉴于以上考虑，并根据98个基岩与上层剪切波速比值的统计结果，我们对复盖层作如下规定：凡两相邻层，下部与上部剪切波速比值大于2.0，且其下面无明显的软弱夹层或者是某层剪切波速大于500米/秒以上者可看做为“基岩”，并将其埋置深度定义为复盖层厚度。按此定义，本文分别计算了77个数据的折算剪切波速，结果发现若将 $V_s$ ：

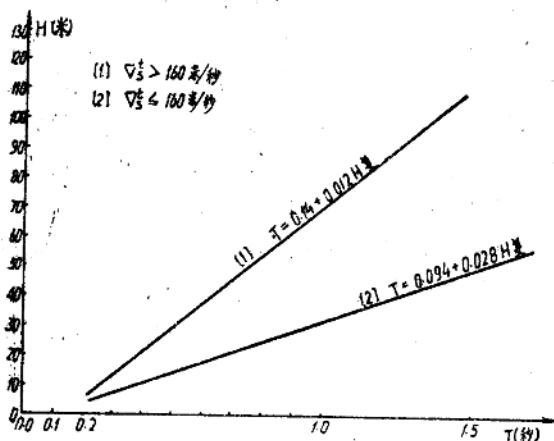


图9 固有周期与复盖层厚的统计关系

划分为小于等于160米/秒和大于160米/秒两组，则固有周期值与复盖层厚有良好的相关性。回归分析结果如图9。其中两组公式相关系数分别为0.947( $V_s \leq 160$ 米/秒)和0.949( $V_s > 160$ 米/秒)。此结果表明，复盖层厚是影响层状土动力特性的重要因素之一。

#### 四、多层土地震反应分析的方法和输入波

目前多层介质地震反应的分析大多是在两个简化假定基础上进行的：

- 1、土层的水平运动可认为是竖向传播剪切波作用的结果；
- 2、地表面、土层分界面以及基岩面基本上是水平无限延伸的。

基于以上假定，多层土的简化模式是剪切梁或剪切型结构，为了计算其动态反应，需要进一步解决以下几个具体问题：

- (1) 土壤参数的估计（动剪切模量，等效粘性阻尼比）；
- (2) 基岩输入波的确定；
- (3) 计算方法和电算程序。

关于土参数最早由Seed和Idriss提出了等价线性化表达方法；而后V. Streeter又提出粘弹性模型。作为基岩输入，较多的是采用以基岩露头实际记录或者按具体情况将实际记录幅度和卓越周期值作适当调整，最近则广泛采用人工地震波。计算方法分别有振型分解，直接积分法和富里哀变换等等。本文按半无限长剪切梁上多质点系模型用富里哀变换法编制了计算程序。对45个典型剖面以人工地震波做为输入，求出各种情况下地震反应的变化规律，以便为分类方法提供一些依据。

## (一) 计算程序

多层土在动荷作用下的试验表明, 阻尼比主要决定于振幅而与频率无关。一般认为复阻尼概念能够较好地反映这一特点; 此外由于基岩并不是刚体, 而是弹性半空间, 因此土层在振动过程中通过这个弹性半空间将带走一部分能量。在土层地震反应分析中通常用“辐射阻尼”的概念来考虑这一部分能量散逸。可以认为富里哀变换法能较好地解决这两个问题。用快速富里哀变换法分析地震反应时, 一般将地震加速度时间序列按周期  $T$ ,  $T/2, T/3, \dots, 2T/N_A$  分解为  $N_A/2$  个具有给定振幅和相位的简谐波, 从而组成输入波的离散化振幅谱和相位谱。由于所考虑的问题是弹性的, 可以适用迭加原理, 因此总的地震反应便是这些简谐波作用下振动反应的总和。

为了便于使用线性化方法计算土层的地震反应, 本文将基岩上单位面积的土柱离散化为剪切型多质点系, 以相邻两质点间的相对位移与其间距的比值作为该处的剪应变。由于只考虑垂直上传播的SH波, 因此基岩可以简化为半无限长剪切梁。它与上面的多质点系的联系满足应力和位移连续条件。图10为《多层土地震反应富里哀变换分析程序》的框图

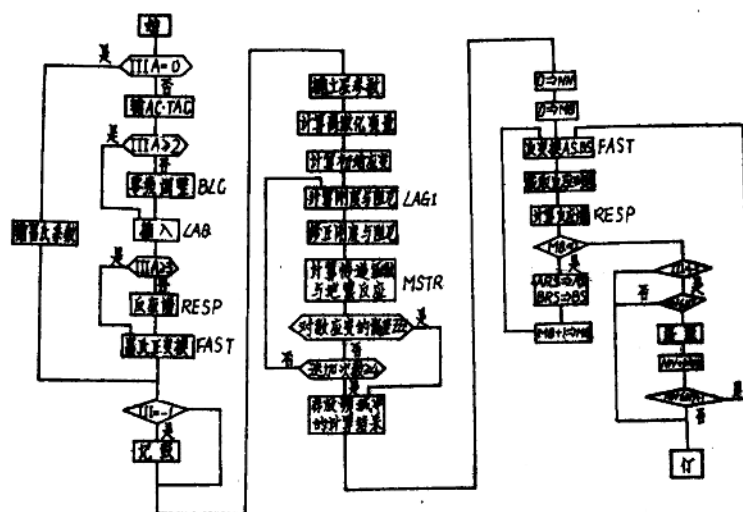


图 10 快速富里哀计算程序框图

图。土的非线性通过等价线性化方法加以考虑。

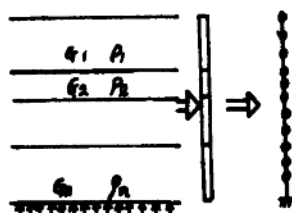


图 11 土层简化模式

## (二) 土层剖面

把场地土看做为水平层状介质, 亦即土层的物理力学性质沿水平方向是不变的, 可将层状土简化为图 11 所示的一维剪切型多质点模型。

就目前的资料来看, 从波传播的概念出发土层的影响深度与地震波的波长有相同的量级。研究成果表明(33), 当冲





统计剖面

表 7

| 波速<br>(米/秒)<br>厚度(米) | 剖面 | I   | II  | III | IV  | V   | VI  | VII | VIII | IX  | X   |
|----------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| 3                    |    | 260 | 178 | 153 | 136 | 120 | 106 | 152 | 195  | 156 | 160 |
| 3                    |    | 335 | 208 | 216 | 167 | 152 | 126 | 219 | 206  | 195 | 220 |
| 4                    |    | 380 | 270 | 207 | 198 | 172 | 144 | 185 | 286  | 179 | 250 |
| 5                    |    |     | 311 | 299 | 244 | 194 | 173 | 272 | 326  | 119 | 250 |
| 5                    |    |     | 450 | 327 | 283 | 222 | 196 | 398 | 278  | 164 | 214 |
| 20                   |    |     |     | 371 | 362 | 312 | 248 |     | 380  | 297 | 163 |
| 30                   |    |     |     |     | 430 | 374 | 319 |     |      | 376 | 348 |
| 30                   |    |     |     |     |     | 443 | 386 |     |      |     |     |
| 30                   |    |     |     |     |     |     | 466 |     |      |     |     |

## (三) 烈度衰减的统计规律

根据国家地震局全国地震烈度区划编图组收集、整理、校订的历史强震153个等震线图(34)，进行烈度衰减统计分析。并将已有的数据按震级大小，舍去震中烈度小于7°的部分进行分类如表8。表中所列“均值”系指等烈度线距离(以公里计)的对数平均值。

数 据 概 况

表 8

| 个<br>数<br>震 级 | 项 目<br>地 震<br>数 目 | 烈 度 |      |     |      |     |      |     |      |     |      |
|---------------|-------------------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|
|               |                   | 10° |      | 9°  |      | 8°  |      | 7°  |      | 6°  |      |
|               |                   | 数 目 | 均 值  | 数 目 | 均 值  | 数 目 | 均 值  | 数 目 | 均 值  | 数 目 | 均 值  |
| 8.0~8.5       | 13                | 12  | 1.38 | 12  | 1.70 | 13  | 1.96 | 12  | 2.2  |     |      |
| 7.5~7.9       | 7                 | 5   | 0.91 | 7   | 1.27 | 7   | 1.50 | 7   | 1.25 |     |      |
| 7.0~7.4       | 27                |     |      | 13  | 1.01 | 26  | 1.29 | 27  | 1.54 | 11  | 1.80 |
| 6.5~6.9       | 20                |     |      | 12  | 0.81 | 19  | 1.10 | 20  | 1.41 | 17  | 1.66 |
| 6.0~6.4       | 17                |     |      | 3   | 0.81 | 10  | 0.86 | 17  | 1.11 | 13  | 1.40 |
| 5.5~5.9       | 25                |     |      |     |      | 7   | 0.74 | 25  | 0.99 | 24  | 1.28 |

鉴于各烈度区平均震中距的对数大致成正态分布，因此对不同震级的等震线进行  $I \sim \log D$  之间的线性回归(如图12)，结果得到如下经验公式：

$$I = a + b \log D$$

..... (9)

式中  $a, b$  为回归系数，其值如表9； $\log D$  为震中距对数的平均值。公式(9)各相关系数为 0.99~1.00，可见相关性很好。

| 震级范围    | 数 值   | 项 目 | a | b     | $\gamma$ |
|---------|-------|-----|---|-------|----------|
| 8.0~8.5 | 15.31 |     |   | -3.76 | 0.99     |
| 7.5~7.9 | 13.39 |     |   | -3.60 | 0.99     |
| 7.0~7.4 | 12.87 |     |   | -3.81 | 1.00     |
| 6.5~6.9 | 11.84 |     |   | -3.49 | 0.99     |
| 6.0~6.4 | 11.14 |     |   | -3.69 | 1.00     |
| 5.5~5.9 | 10.69 |     |   | -3.69 | 1.00     |

从图 12 可看出,不同震级的回归线大致呈平行直线,其斜率基本相同,为使用方便,用如下公式来拟合这一组直线:

$$I = 0.92 + 1.63M - 3.49 \log D$$

该式的结果如图中虚线所示,可看出它与原始回归线比较接近。

#### (四) 基岩运动的谱特征

如上所述,我们在研究场地分类时考虑了实际工程中可能遇到的各种土层剖面,为了对它们作详细的地震反应分析,需确定基岩运动,因此先要确定基岩运动的谱特征。

我国在基岩上所获得的少数几个强震记录大多是辽宁海城,河北唐山地震的强余震;单凭这些记录还不足以给出震级,震中距对谱形状影响的明显规律。为此选用近几年来日本、美国以及我国利用国外强震记录统计分析的结果(见表10)。由表可知,不同研究所依据的数据是相当分散的,说明基岩运动的特征具有某种地区特性。为了研究基岩运动谱特性随不同震级、震中距的变化趋势,本文按表10中各公式分别对表11中所给出的六种典型情况计算了基岩运动反应谱(周期取0.05秒~4.00秒间的18个值),其结果如图13。由图可看出,不同研究者所给出的差异较大,即使是使用大致相同资料源的两个研究〔10〕、〔32〕,其结果也并不一样。就共同的趋势来看,加速度反应谱中的主峰出现的周期因震级增大距离增长并无明显变化。需要指出的是,表10资料中4、6两种情况为硬基岩,从基岩输入角度来看,所给出的结果可能更为接近实际情况。硬软基岩(地下、地上观测)对比资料较少,〔35〕、〔36〕所给出的结果表明,硬软基岩在谱形状上很相似,而最大幅值前者约为后者的一半。就此两种与其它四种软基岩情况来看,计算结果表

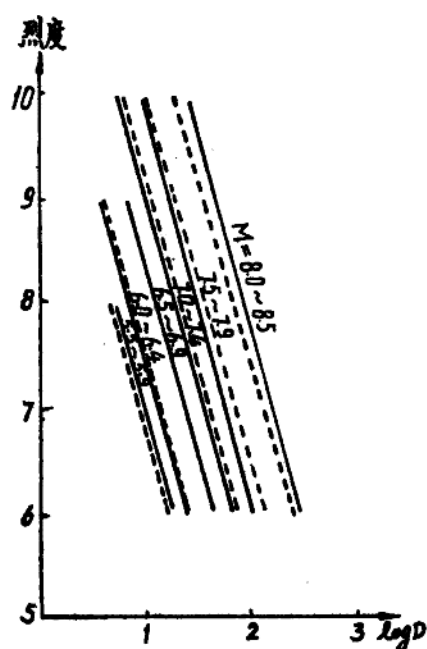


图 12 烈度衰减统计  
实线为公式(9)值; 虚线为公式(10)值