

JIANZHU KANGZHEN SHEJI JI SHILI
JIANZHU JIEGOU DE SHEJI JI TANSUXING FANYING FENXI

建筑抗震设计及实例

——建筑结构的设计及弹塑性反应分析

傅金华 著

中国建筑工业出版社

建筑抗震设计及实例

——建筑结构的设计及弹塑性反应分析

傅金华 著

地震及抗震设计

中国建筑工程出版社

图书在版编目(CIP)数据

建筑抗震设计及实例——建筑结构的设计及弹塑性反应分析/

傅金华著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2008

ISBN 978-7-112-10180-1

I. 建… II. 傅… III. 建筑结构—抗震设计 IV. TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 090659 号

本书共分 10 章。第 1 章介绍地震的发生原因、规模及地震波的传播的方法。第 2~4 章介绍结构动力学的基本知识, 主要涉及单自由度体系、多自由度体系及无限自由度体系的振动特性及它们之间的相互关系。第 5 章主要讲地震波的分析、归纳方法, 人工模拟地震波的作成方法。第 6 章介绍结构地震反应分析常用的几种具有代表性的数值计算方法。第 7 章涉及内容为现阶段结构地震反应分析中常用的梁、柱及剪力墙等构件的弹塑性分析模型, 以及这些构件的恢复力滞回模型。第 8 章论述结构的平面分析及立体结构分析的基本方法。第 9 章介绍混凝土、钢材等建筑材料的各种弹塑性特性, 以及整个结构的地震反应特性。第 10 章介绍隔震装置的弹塑性性质, 以及隔震结构、减震结构的振动特性。

本书既适用于土木、建筑专业的工程技术人员, 也可供高校师生学习使用。

* * *

责任编辑: 常 燕

建筑抗震设计及实例

——建筑结构的设计及弹塑性反应分析

傅金华 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 28 $\frac{1}{4}$ 字数: 636 千字

2008 年 9 月第一版 2008 年 9 月第一次印刷

定价: 56.00 元

ISBN 978-7-112-10180-1

(16983)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

在无数自然灾害中,地震给建筑物带来的损害是巨大的。鉴于这点,可以说抗震设计是结构设计过程中最为重要的环节。进行结构的抗震设计,首先应当正确理解结构在地震荷载作用下的振动特性。因此,对于从事土木、建筑专业的工程技术人员、高等学校在校学生来讲,系统地、全面地、正确地理解结构的振动特性是极为必要的。

本书尽可能涉及与结构抗震有关的所有内容,但由于篇幅的关系,对于有些问题不能进行详细地推导,在此只是作了简单的介绍。如果读者有兴趣继续深入探讨、学习,可参照本书后面所列的参考文献。

本书的大部分参考资料主要来自于日本。日本是一个多地震国家,在日常生活中,中小型地震经常发生,但这些地震并没有对建筑结构造成重大破坏。作者认为,在现阶段,无论从理论研究,还是从实际工程技术来讲,日本的结构抗震研究都是比较先进的。取人之长,补己之短,参考、学习日本的抗震成果对于我国工程技术人员、高等学校师生来讲,是十分必要的。

本书共分十章。第一章主要说明地震的发生原因、规模及地震波的传播的方法。从第二章到第四章为结构动力学的基本知识,主要涉及单自由度体系、多自由度体系及无限自由度体系的振动特性及它们之间的相互关系。这些体系都为弹性体系。第五章的内容包括两方面。一方面为地震波的分析、归纳方法,另一方面为人工模拟地震波的作成方法。第六章主要介绍结构地震反应分析常用的几种具有代表性的数值计算方法。第七章涉及内容为现阶段结构地震反应分析中常用的梁、柱及剪力墙等构件的弹塑性分析模型,以及这些构件的恢复力滞回模型。第八章主要论述结构的平面分析及立体结构分析的基本方法。第九章主要介绍混凝土、钢材等建筑材料的各种弹塑性特性,以及整个结构的地震反应特性。第十章的主要内容为隔震装置的弹塑性性质,以及隔震结构、减震结构的振动特性。

作者 1988 年留学于日本东北大学工学部建筑学科构造学研究室。在结构动力学、

结构抗震分析等方面得到了柴田明德教授的指导。在五年的留学生活中，无论在研究方面，还是在个人生活方面，柴田教授都给予了热心的指导和极大的帮助，这是作者永远不能忘怀的。作者在此表示衷心地感谢。

作者现在工作于日本的 P. S. 三菱株式会社。作者将感谢对本书的编写予以协力的 P. S. 三菱株式会社的有关人员。

在本书的出版过程中，中国建筑工业出版社的常燕女士给予了很大的支持与帮助，作者在此表示由衷地感谢。

由于作者长期居住海外，对于一些专业词汇可能有使用不当之处。由于时间限制，作者水平有限，缺点错误在所难免，敬请读者批评指正。

傅金华

目 录

第 1 章 地震及地震波	1
1.1 地震	1
1.2 地震波	2
1.3 地表附近媒质的增幅特性	7
1.4 水平振动与上下振动	12
1.5 地震的规模	13
第 2 章 单自由度体系的振动	19
2.1 振动的基础知识	19
2.2 无阻尼单自由度体系的自由振动	25
2.3 有阻尼单自由度体系的自由振动	28
2.4 单自由度体系的强迫振动	39
2.5 单自由体系的地震振动	64
2.6 能量方法对振动的考察	73
2.7 振动平衡方程式的能量推导方法	79
2.8 等效阻尼	85
第 3 章 多自由度体系的振动	89
3.1 无阻尼多自由度体系的特征值分析	89
3.2 有阻尼多自由度体系的特征值分析	104
3.3 多自由度体系的自由振动	118
3.4 有阻尼多自由度体系的强迫振动	122
3.5 多自由度体系的地震振动	125
3.6 多自由度体系与单自由度体系的关系	131
3.7 建筑结构阻尼的评价方法	143
第 4 章 无限自由度体系的振动	149
4.1 无限自由度体系的弯曲自由振动	149
4.2 无限自由度体系的剪切自由振动	169
4.3 无限自由度体系的轴方向自由振动	172

4.4 无限自由度体系的弯曲强迫振动	176
4.5 无限自由度体系的弯曲地震振动	178
4.6 无限自由度体系圆频率的近似算法	179
第 5 章 地震波的傅里叶分析与人工模拟地震波	185
5.1 傅里叶级数	185
5.2 傅里叶级数的复数表示形式	192
5.3 任意周期区间上的傅里叶级数	195
5.4 傅里叶变换	201
5.5 有限傅里叶变换	204
5.6 人工模拟地震波	214
第 6 章 地震反应分析的数值算法	225
6.1 Runge-Kutta 法	226
6.2 Newmark 的 β 法	234
6.3 Wilson 的 θ 法	244
6.4 精密解析法	248
第 7 章 构件的弹塑性分析模型及恢复力滞回模型	251
7.1 分层模型	251
7.2 构件的平面分析模型	268
7.3 构件的立体分析模型	288
7.4 剪力墙分析模型	300
7.5 构件的恢复力滞回模型	309
第 8 章 建筑结构的振动分析方法	317
8.1 结构的平面分析方法	317
8.2 结构的立体分析方法	328

第 9 章 构件及结构的弹塑性性质	339
9.1 构件的弹塑性性质	339
9.2 构件的变形与结构全体变形的关系	359
9.3 结构的弹塑性性质	363
9.4 结构的能量与变形的关系	370
9.5 结构地震损害程度的预测	373
 第 10 章 隔震结构及减震结构	381
10.1 隔震结构	382
10.2 减震结构	409
10.3 隔震及减震结构的设计实例	425
 参考文献	439
 作者简介	443

第 1 章 地震及地震波

1.1 地震

地球的半径约为6370km。如图1-1所示，地球最里部称为地核(the earth's nucleus)，而地核又由内核及外核构成。内核由比重较大的金属元素构成，处于固体状态，外核则为液体状态。地球的中间部分称为地幔(mantle)，厚度约为2900km。地球最外层称为地壳(the crust)，其构成成分为花岗岩、玄武岩等固体岩石，厚度大小不等，约为5~60km，平

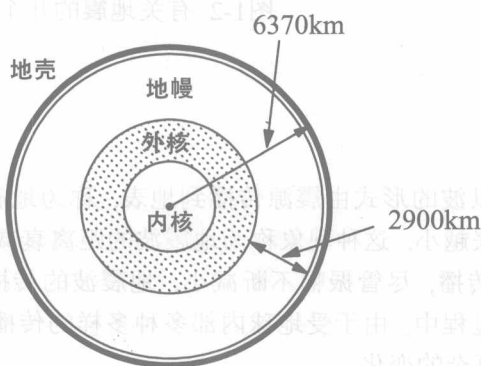


图1-1 地球内部示意图

均厚度大约为35km，不及地球半径的1/100。如果把地球比作一个圆形鸡蛋，那么地壳则为相当薄的蛋壳。地球表面又分为陆地与海洋，一般来讲，陆地部分地壳的厚度较大，而海洋部分地壳的厚度则较小。地壳并非一个连续的整体，它被一些海沟、海岭分割为不同大小的板块(plate)，这些板块浮于地幔上面，如同冰山漂浮于海洋上面一样。地球内部的温度不同，越接近地核，温度就越高。由于内部温度差的影响，地幔产生对流作用。浮于地幔上的板块由于受地幔对流的影响，将发生缓慢的移动，每年的移动距离大约为几厘米。由于地幔对流的不均匀性，各个板块的移动速度也不相同。板块之间的速度差促使构成地壳的岩石受到挤压，发生变形，并使其应变不断增加。当应变达到极限值时，岩石发生破坏，积蓄在岩石中的能量被释放出来，这就是地震(earthquake)。

参考图1-2，说明与地震有关的几个概念：

震源：地壳中岩石最初发生破坏的地点称为震源(hypocenter)，震源位置一般在地表几十公里以下；

震中：震源点上面的地表称为震中(epicenter)。震中是地表距震源的最近点，地震带来的破坏最大；

震源距离：从震源到观测点的距离称为震源距离(hypocentral distance)；

震中距离：从震中到观测点的距离称为震中距离(epicentral distance)；

震源深度：从震源到震中的距离称为震源深度(focal depth)。

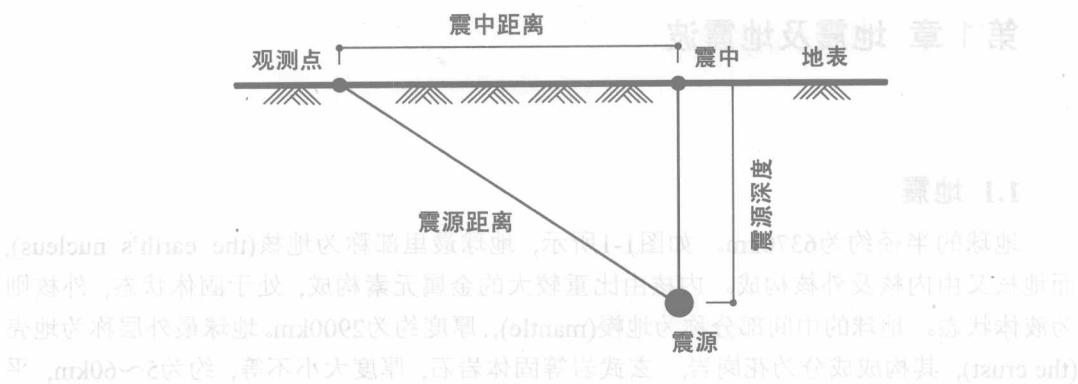


图1-2 有关地震的几个概念

1.2 地震波

地震能量是以波的形式由震源传播到地表，称为地震波。地震波的传播距离越远，其振幅就变得越来越小，这种现象称为地震波的距离衰减现象(distance damping)。如果在均质的媒质中传播，尽管振幅不断减小，地震波的传播形式并不发生变化。实际上，在地震波的传播过程中，由于受地球内部多种多样的传播媒质的影响，地震波的传播途径、大小要发生复杂的变化。

地震波并非单纯波，而是包含各种波形的复合波，其分类如图1-3所示^[1.1]。



图1-3 地震波的分类

图1-4为纵波(longitudinal wave)及横波(transverse wave)的振动及传播的示意模型。由于传播速度较快，纵波又称P波(Primary wave)。纵波的振动方向与传播方向相同。在纵波的传播过程中，周围媒质不断受到压缩及拉伸，其体积发生变化，因此，纵波又称为疏密波(dilatational wave)或压缩波(compression wave)。

横波又称剪切波，或简称S波(Shear wave)。由于横波的速度比纵波慢，又称横波为第二波(Secondary wave)。如图1-4所示，在横波的传播过程中，周围媒质的体积不发生变化，但产生变形，因此横波也称为扭转波(rotational wave)。横波的振动方向与传播方向垂直。横波又分为SV波与SH波。虽然这两种波都与传播方向垂直，但SV波与SH波的

振动方向不同。如图1-5所示,如果地震波由地下向地表传播,那么横波的振动方向应与传播方向垂直。这个振动方向又可以分解为2个方向:一个在纸面内,一个与纸面垂直。与纸面垂直振动的波称为SH波,其振动方向与地表或境界面平行,属于水平振动(horizontal vibration)。在纸面内振动的波称为SV波。除垂直传播以外,由于SV波总是具有上下振动(vertical vibration)的成分,故称其为SV波。如果横波由下向上垂直传播,此时只有SH波,没有SV波。

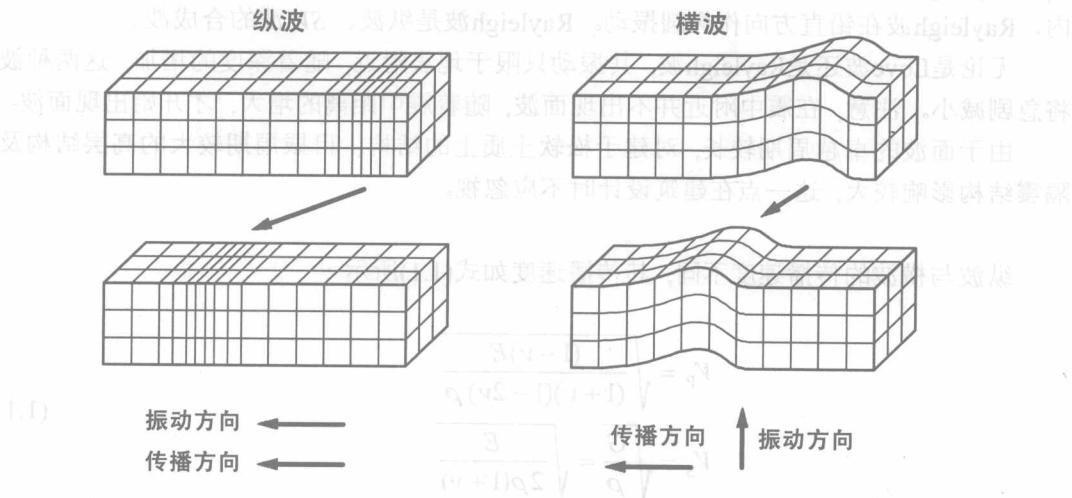


图1-4 横波、纵波的传播及振动方向

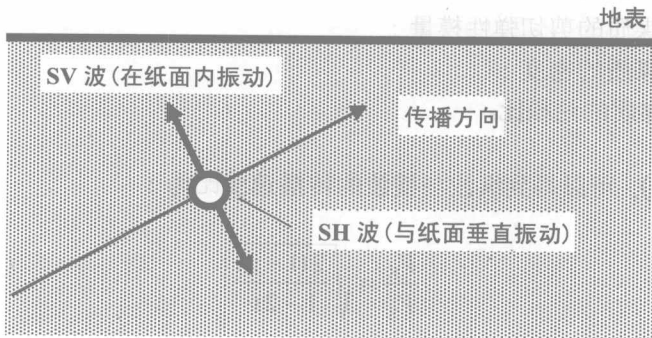


图1-5 SV波及SH波的振动方向

与纵波相比,横波的振动幅度较大,对于处于地表的建筑结构破坏力较强。在建筑结构的振动分析中使用的地震波常常就是指横波。

由于纵波及横波都是在地球内部传播,所以两者合称为体波(body wave)。

顾名思义,面波(surface wave)是指沿地球表面传播的地震波。面波中的Love波与Rayleigh波都是以发现者的名字命名的波。Love波与Rayleigh波的区别为:

Love波与横波相似,在传播过程中媒质的体积并不发生变化,它的振动方向与传播方向成直角。Love波与横波的不同点为:Love波不具有SV波那样的垂直振动成分,只具有SH波那样的水平振动成分。距地表深度不同,Love波的振幅也不同。距地表越深,Love波的振幅就越小;越接近地表,Love波的振幅就越大。

Rayleigh波与纵波相似,在传播过程中媒质的体积发生变化。在包含传播方向的平面内,Rayleigh波在铅直方向作椭圆振动。Rayleigh波是纵波、SV波的合成波。

无论是Love波还是Rayleigh波,其振动只限于地表附近,随着深度的增加,这两种波将急剧减小。注意,在震中附近并不出现面波,随着震中距离的增大,才开始出现面波。

由于面波的卓越周期较长,对建于松软土质上的结构、自振周期较大的高层结构及隔震结构影响较大,这一点在建筑设计时不应忽视。

纵波与横波的传播速度不同,其传播速度如式(1.1)所示:

$$\begin{aligned} V_P &= \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \\ V_S &= \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \end{aligned} \quad (1.1)$$

式中 V_P —— 纵波的传播速度;
 V_S —— 横波的传播速度;
 E —— 媒质的弹性模量;
 G —— 媒质的剪切弹性模量;
 ρ —— 媒质的密度;
 ν —— 媒质的泊松比。

根据式(1.1),可以得到纵波与横波的传播速度比为:

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (1.2)$$

从式(1.2)可以看出,纵波与横波的传播速度比与周围媒质的弹性模量 E 及剪切弹性模量 G 无关,只与媒质的泊松比 ν 有关。由于媒质的泊松比 $\nu < 1$,所以总有 $V_P > V_S$ 成立。也就是说,纵波的传播速度要比横波快。地壳中媒质的泊松比大约为0.25左右,所以纵波与横波的传播速度之间有以下关系:

$$V_P \approx \sqrt{3} V_S \quad (1.3)$$

由式(1.3)可知, 由于纵波的传播速度较快, 在地震发生时我们最先感觉到的振动是纵波。

地壳中的媒质由许多性质不同的物质组成。为分析简便, 在深度方向, 我们把同一性质的媒质归纳为1层。这样, 地震波所通过的媒质就可以简单地划分很多平行层。当地震波在通过这些层的分界面时, 将发生与光波同样性质的现象, 即产生反射波(reflection wave)与折射波(refraction wave)。一般来讲, 从地壳中越接近地表, 媒质的弹性模量、剪切弹性模量越小。从式(1.1)可以看出, 如果媒质的弹性模量 E 、剪切弹性模量 G 越小, 地震波的传播速度就越慢。因此, 地表附近地震波的传播速度要小于地壳中地震波的传播速度。

参考图1-6, 有一束地震波, 也称为入射波(incident wave), 由媒质 A 向媒质 B 传播。根据荷兰数学家Willebrord Snell发明的光与波的传播法则(Snell law), 应有下式成立:

$$\frac{\sin \theta_A}{V_A} = \frac{\sin \theta'_A}{V_A} = \frac{\sin \theta_B}{V_B} = \text{常数} \quad (1.4)$$

式中 θ_A —— 媒质 A 中的入射角;
 θ'_A —— 媒质 A 中的反射角;
 θ_B —— 媒质 B 中的折射角;
 V_A —— 媒质 A 中的传播速度;
 V_B —— 媒质 B 中的传播速度。

由式(1.4)可以看出, 在媒质 A 中由于传播速度不变, $\theta_A = \theta'_A$ 。如果在媒质 B 中的传播速度 V_B 小于媒质 A 中的传播速度 V_A , 那么就应有 $\theta_B < \theta_A$ 成立。

式(1.4)无论对纵波还是对横波都适用。注意, 应用式(1.4)得到的折射角或反射角都不能大于90度, 即 θ'_A 、 θ_B 的极限角为90度。

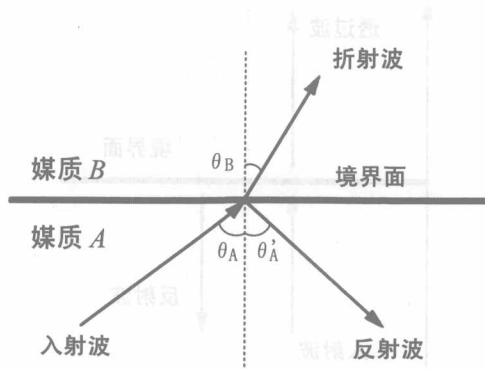


图1-6 地震波的折射

越接近地表，地震波的传播速度越慢，由式(1.4)得到的折射角就越小。如图1-7所示，当地震波到达地表附近时，可近似认为折射角 $\theta \approx 0$ ，也就是说，在地表附近地震波可以近似看作是由下往上垂直传播的。

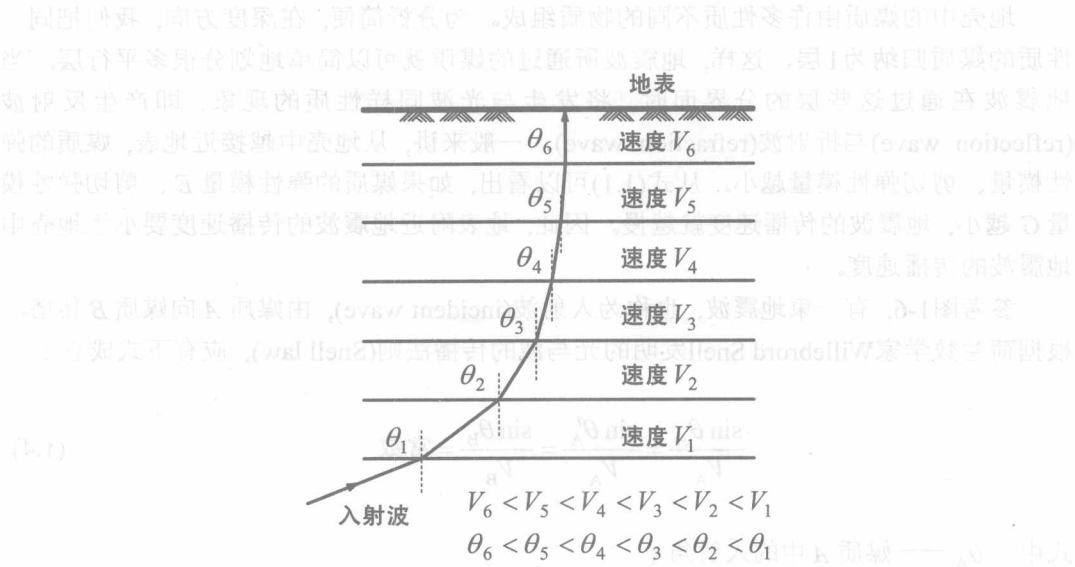


图1-7 地表附近地震波的传播

如图1-8所示，当垂直入射的地震波到达两种媒质的境界面时，同样，将发生折射与反射。在地表附近，由于地震波由下向上垂直入射，所以折射波、反射波都与境界面垂直。在这种情况下，折射波一般称为透过波(transmitted wave)。

应当注意，地震波在通过不同媒质的境界面时，虽然振幅、方向、速度发生变化，但波的形状不发生变化。

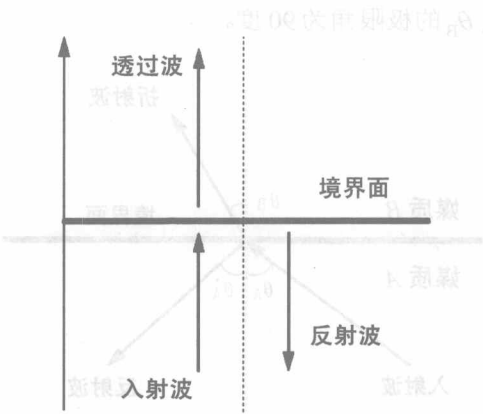


图1-8 地表附近地震波的折射与反射

1.3 地表附近媒质的增幅特性

地震波由地球内部传播到地表，要通过很多性质不同的传播媒质。媒质虽然有很多层，但对建筑结构具有重要影响的则是接近地表各层的土质构造。如图1-9所示，如果土质逐渐变得松软，那么由下往上传播的地震波，其振幅将被扩大。下面我们根据重复反射理论(multiple reflection theory)说明地震波在传播过程中其振幅的变化。与纵波相比，由于横波对土质及建筑结构的影响较大，今后这里所说的地震波是指横波。

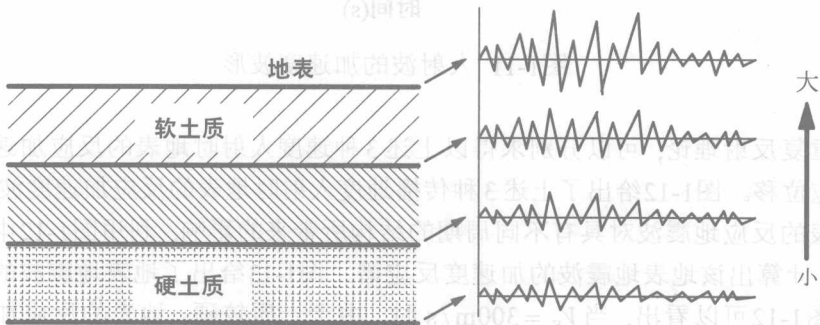


图1-9 土质的松软对地震波振幅的影响

下面，我们以实际地震波为例说明地表附近媒质的增幅特性。如图1-10所示，为分析简便，设土质只有1层，厚度为50m。在此，我们作以下假设：与地震波的大小无关，土质永远保持弹性状态。入射波为日本川崎地区的人工模拟地震波，其加速度波形如图1-11所示。入射方向由下向上垂直入射。设地震波在土质中的传播速度 V_s 分别为下列3种情况：

- (1) $V_s = 100\text{m/s}$ (松软土质)；
- (2) $V_s = 200\text{m/s}$ (一般土质)；
- (3) $V_s = 300\text{m/s}$ (坚硬土质)。

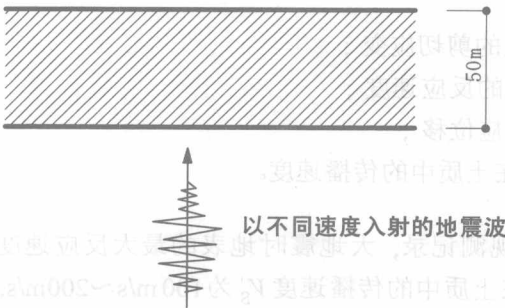


图1-10 解析例的土质

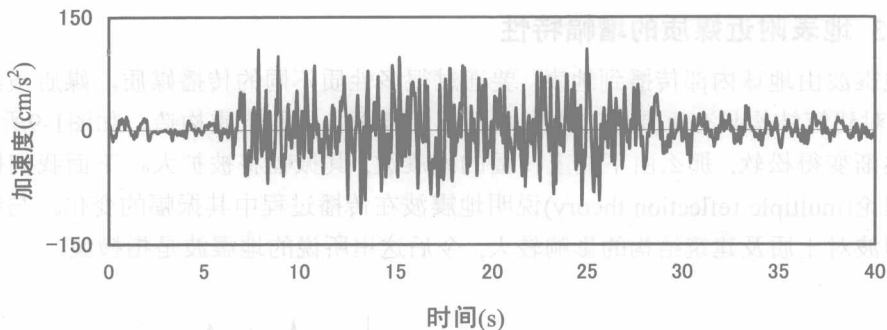


图1-11 入射波的加速度波形

根据重复反射理论,可以分别求得以上述3种速度入射时地表的反应加速度、反应速度及反应位移。图1-12给出了上述3种传播速度入射时地表的反应加速度波形。同时,为明确地表的反应地震波对具有不同周期的结构所带来的影响,利用图1-12中的地表反应加速度,计算出该地表地震波的加速度反应谱。图1-13给出了地表地震波的加速度反应谱。由图1-12可以看出,当 $V_s = 300\text{m/s}$ 时,由于土质较硬,地表的反应加速度则较小;当 $V_s = 100\text{m/s}$ 时,土质松软,地表的反应加速度则较大。由此可以看出,位于松软土质上的建筑结构所受到的地震振动,要比位于坚硬土质上的建筑结构大。

在以上土质的波动分析中,我们应用了土质永远保持弹性的假定。其实应用这种假定是有限制条件的:

① 入射地震波的强度较小;

② 土质不发生较大变形。

如果入射地震波的强度较大,那么土质将发生很大的变形。如果这一变形超过土质的弹性极限,那么土质将进入塑性状态。

在地震波作用下,土质发生的剪切应变可以表示为下式:

$$\gamma = \frac{du}{dx} = \frac{du}{dt} / \frac{dx}{dt} = \frac{\dot{u}}{V_s} \quad (1.5)$$

式中 γ —— 土质产生的剪切应变;

$\dot{u}$ —— 土质产生的反应速度;

u —— 土质的反应位移;

V_s —— 地震波在土质中的传播速度。

根据已往的地震观测记录,大地震时地表的反应速度可达 50cm/s (也表示为 50kine),如果地震波在土质中的传播速度 V_s 为 $100\text{m/s} \sim 200\text{m/s}$,那么根据式(1.5),可以得知地表附近土质的最大剪切应变可达 $2.5 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$ 。当土质产生这么大的剪切应变时,说明土质已经进入塑性状态。

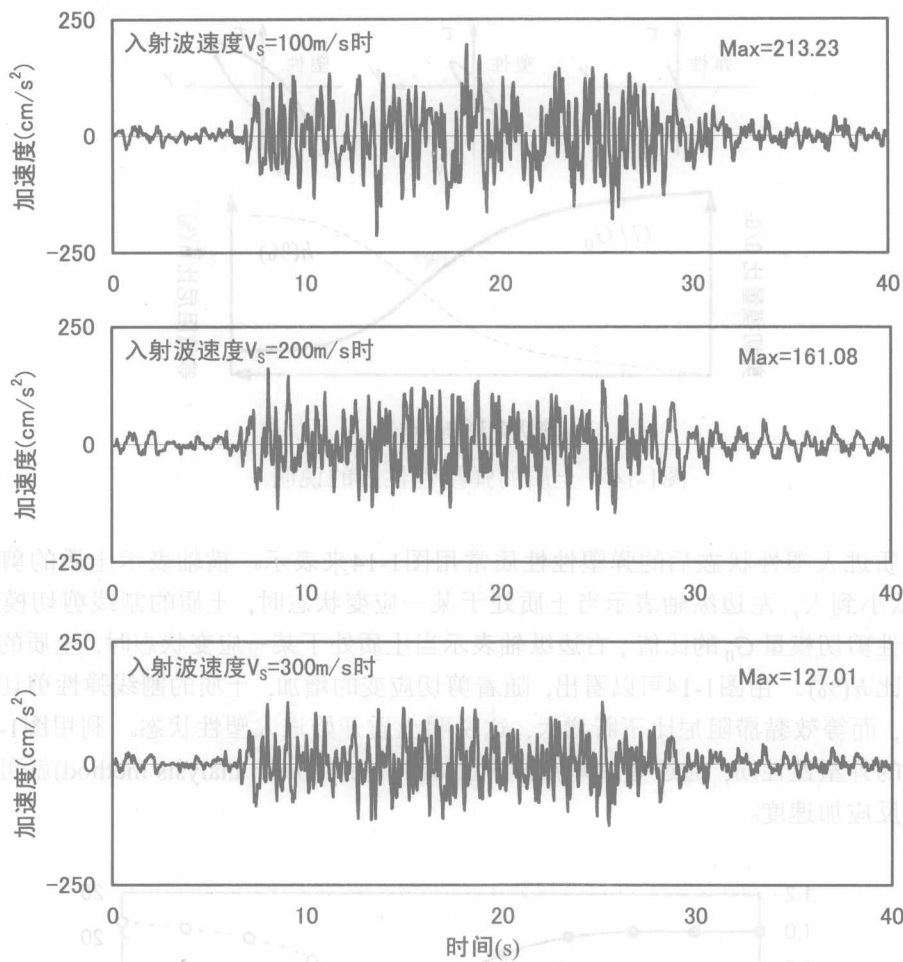


图1-12 地表的反应加速度波形

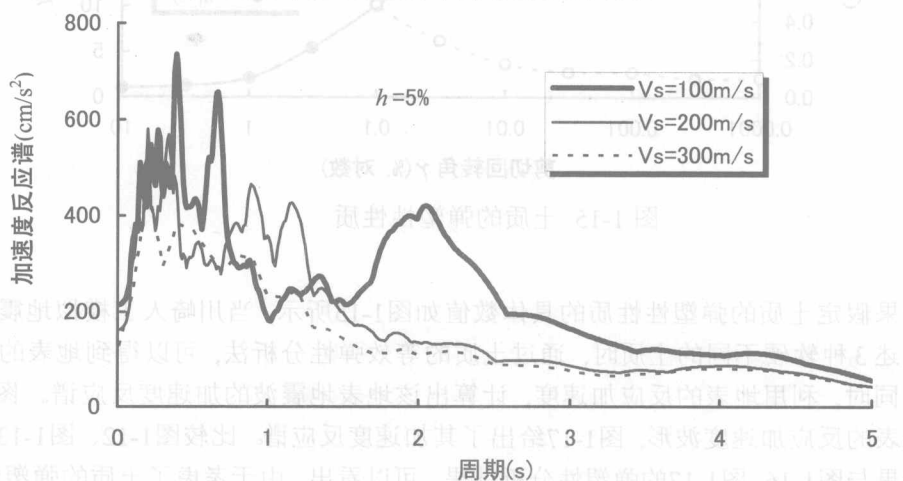


图1-13 地表的加速度反应谱(h 为阻尼比)