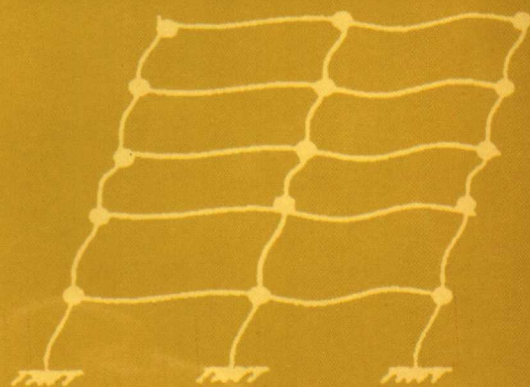


WUTP

抗震设计系列丛书

结构地震作用和抗震概念设计

吕西林 蒋欢军 编



武汉理工大学出版社

WUTP Wuhan University of Technology Press

TU352.1

40

2004

建筑结构抗震系列丛书之一

结构地震作用和抗震概念设计

吕西林 蒋欢军 编

武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

内 容 提 要

本书结合新版的《建筑抗震设计规范》(GBJ 50011—2001)和《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002)编写,介绍了结构抗震的基本理论和抗震设计方法,有助于读者学习和掌握新规范,以配合新规范的颁布执行。

本书共分5章,分别介绍了地震的基本知识、结构地震反应分析与反应谱理论、地震作用和结构抗震验算、建筑抗震概念设计和非结构构件抗震设计。部分章节中附有例题和计算机程序,便于读者学习与理解。

本书可作为土木工程专业的大学生和研究生的教学参考书,也可作为各类成人教育学生的自学用书以及工程技术和科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

结构地震作用和抗震概念设计/吕西林,蒋欢军编著. —武汉:武汉理工大学出版社,2004. 8
ISBN 7-5629-2082-6

I. 结…

II. ①吕… ②蒋…

III. 建筑结构-抗震设计-高等学校-教材

IV. TU352·104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 005338 号

出版者:武汉理工大学出版社(武汉市武昌珞狮路 122 号 邮编:430070)

印刷者:武汉理工大印刷厂

发行者:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16

印 张:10.25

字 数:254.3 千字

版 次:2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1—3000 册

定 价:20.00 元

(本书如有印装质量问题,请向承印厂调换)

前 言

地震一直是人类面临的最严重的自然灾害之一,中国是一个多地震的国家,地震灾害严重。大量的震害经验表明,震前的抗震设防是减轻地震灾害最有效的途径。抗震工作应实行“以防为主”的方针,通过抗震设防提高工程结构的抗震能力。提高土木工程专业大学生、研究生及工程技术人员的抗震理论水平和实际应用能力,对于提高工程结构的抗震设计质量至关重要。有鉴于此,本书作者结合多年来的工程结构抗震教学、科研和工程实践,并吸收国内外抗震研究的成果,编写了本书。本书作者长期从事工程结构抗震研究和教学工作,参加了国家标准《建筑抗震设计规范》(GBJ 50011—2001)的编制,主持编写了上海市标准《建筑抗震设计规程》(DGJ 08—9—2003)。

本书介绍了有关地震的基本知识、结构地震反应的分析方法、结构抗震设计中的两个主要范畴——抗震参数设计(主要包括地震作用的计算及抗震验算方法)和抗震概念设计、非结构构件的抗震设计。本书注重基本理论的阐述,并注意基本理论与工程实践的紧密结合,结合新版的《建筑抗震设计规范》(GBJ 50011—2001)和《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3—2002)编写,有助于读者理解结构抗震设计中的一些基本理论和基本方法,学习和掌握新规范,熟练运用新规范进行建筑结构的抗震设计。

由于作者水平限制,书中难免有不足或疏漏之处,热切希望读者和同行专家批评和指正。

作者

2004年1月

目 录

1 地震的基本知识	(1)
1.1 地震成因与地震类型	(1)
1.2 地震波	(4)
1.3 地震震级与地震烈度	(8)
1.4 地震活动与分布	(12)
1.5 地震灾害	(15)
2 结构地震反应分析与反应谱理论	(20)
2.1 概述	(20)
2.2 单自由度体系的自由振动	(23)
2.3 单自由度体系在任意荷载作用下的受迫振动	(27)
2.4 单自由度体系弹性地震反应的数值计算	(28)
2.5 抗震设计反应谱	(33)
2.6 单自由度体系的非线性地震反应与计算	(39)
2.7 多自由度体系的自由振动	(45)
2.8 多自由度体系的振型分解法	(61)
2.9 多自由度体系的水平地震作用及效应	(64)
2.10 结构在水平地震作用下的平移和扭转振动耦合反应	(71)
2.11 多自由度体系地震反应的时程分析	(79)
3 地震作用和结构抗震验算	(87)
3.1 建筑的抗震设防	(87)
3.2 地震作用的计算	(91)
3.3 结构抗震验算	(100)
3.4 结构静力弹塑性分析	(105)
4 建筑抗震概念设计	(115)
4.1 概述	(115)
4.2 建筑场地的选择	(115)
4.3 建筑和结构的规则性	(118)
4.4 结构体系	(132)
4.5 结构的延性	(139)
5 非结构构件抗震设计	(145)
5.1 概述	(145)
5.2 抗震计算要点	(147)
5.3 建筑非结构构件的基本抗震措施	(150)
5.4 建筑附属机电设备支架的基本抗震措施	(152)

5.5 考虑附属设备与结构共同工作的简化抗震分析方法 (153)

5.6 抗震设计实例 (156)

参考文献..... (158)

1 地震的基本知识

1.1 地震成因与地震类型

地震是一种自然现象。据统计,全世界每年发生的地震约达 500 万次,绝大多数地震由于发生在地球深处或者它所释放的能量小而使人们难以感觉到,人们能感觉到的有感地震约占地震总数的 1%,其中造成灾害的强烈地震平均每年发生十几次。强烈地震会引起地面剧烈摇晃和颠簸,造成建筑物的破坏并危及人民的生命和财产安全。地震还可能引起火灾、水灾、山崩、滑坡以及海啸等灾害。

地震是人类面临的最严重的自然灾害之一,人类对地震认识的历史也是源远流长。我国早在公元前 1831 年就有了地震的记录,关于地震现象的更早的文字记录可以追溯到公元前中东和阿拉伯的象形文字的记载。为了与地震灾害作斗争,人类自古以来一直对地震进行着探索,对地震的认识也随着人类文明的进步而深入。

1.1.1 地球的构造

为了便于了解地震的成因及其发展规律,我们简单地介绍一下地球的构造。

地球是一个近似于球体的椭球体,平均半径约 6370km,赤道半径约 6378km,两极半径约 6357km。从物质成分和构造特征来划分,地球可分为三大部分:地壳、地幔和地核(图 1.1)。

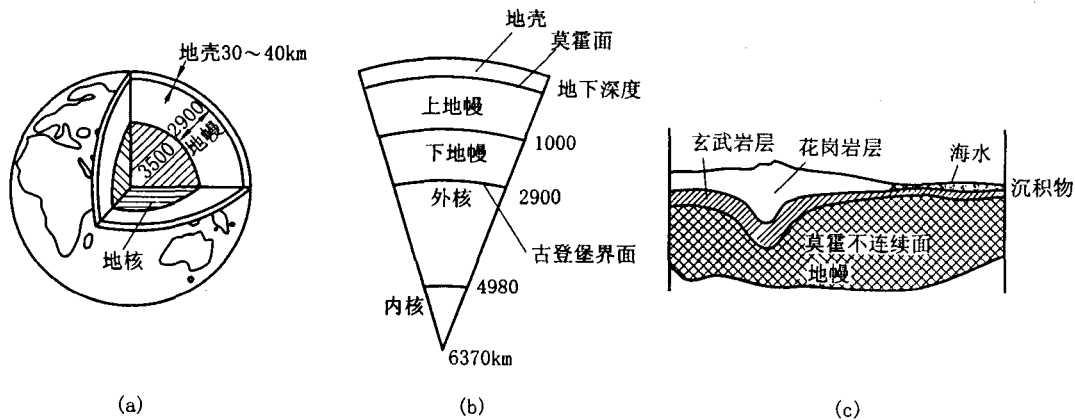


图 1.1 地球断面与地壳剖面
(a) 地球断面; (b) 分层结构; (c) 地壳剖面

1. 地壳

地壳是地球外表面的一层很薄的外壳,它由各种不均匀的岩石组成。地壳表面为沉积层,陆地下面主要有花岗岩层和玄武岩层,海洋下面的地壳一般只有玄武岩层。地壳的下界称为莫霍界面,是一个地震波传播速度发生急剧变化的不连续面。地壳的厚度在全球变化很大,各

处厚薄不一,大陆内一般厚 16~40km,高山地区厚度更大,如中国青藏高原及天山地区厚达 70km。海洋下面厚度最小,一般为 10~15km,最薄处约 5km。世界上绝大部分地震都发生在这一薄薄的地壳内。

2. 地幔

地壳以下到深度约 2895km 的古登堡界面为止的部分为地幔,约占地球体积的 5/6。地幔由质地坚硬、密度较大的黑色橄榄岩等超基性岩石组成,其中上地幔物质结构不均匀,中、下地幔部分是比较均匀的。地幔上部存在着一个厚度约几百公里的软流层。由于温度和压力分布的不均匀,软流层物质发生了对流运动。

3. 地核

古登堡界面以下直到地心的部分为地核,地核半径约为 3500km,又可分为外核和内核。据推测,地核的物质成分主要为镍和铁,温度高达 4000~5000℃。由于至今还没有发现有地震横波通过外核,故推断外核处于液态,而内核可能是固态。

地球各部分的密度随深度增加而增大,地球内部的温度也随深度增加而升高。地球内部的压力强度在地幔上部约为 883MPa ($9 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$),地核中心达 36284MPa ($37 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$)。

1.1.2 地震的发生过程

地震就是地球内某处岩层突然破裂,或因局部岩层塌陷、火山爆发等发生了振动,并以波的形式传到地表引起地面的颠簸和摇晃,从而引起了地面的运动。发生地震的地方叫震源。震源是有一定范围的,但地震学里常常把它当作一个点来处理,这是因为地震学考虑的是大范围的问题,震源相对来说很小,可以当作一个点。震源在地表的投影称为震中。地面某处观测点到震中的距离称为震中距。震源至地面的垂直距离称为震源深度。在震中附近,振动最强烈、破坏最严重的区域称为极震区。上述常用的地震术语如图 1.2 所示。根据震源深度的大小可把地震分为浅源地震(震源深度小于 60km)、中源地震(震源深度在 60~300km)和深源地震(震源深度大于 300km)。



图 1.2 常用地震术语示意图

世界上绝大部分地震是浅源地震,震源深度集中在 5~20km,中源地震比较少,而深源地震为数更少。全世界所有地震释放能量的 85% 来自浅源地震,12% 来自中源地震,3% 来自深源地震。中国东北吉林省东部地区曾发生过深源地震。一般来说,对于同样大小的地震,当震源较浅时,波及范围较小,而破坏程度较大;当震源深度较大时,波及范围则较大,而破坏程度相对较小,震源深度超过 100km 的地震通常不会在地面上引起灾害。

1.1.3 地震的成因与类型

地震按其成因可分为构造地震、火山地震、塌陷地震等,此外,水库也能诱发地震,核爆炸可能在地场激发地震。

构造地震是由于地应力在某一地区逐渐增加,岩石变形也不断增加,当不断增大的地应力超过岩石的极限强度时,在岩石的薄弱处突然发生断裂和错动,部分应变能突然释放,引起振动,其中一部分能量以波的形式传到地面,这就产生了地震。构造地震发生断裂错动的地方形成断层,叫做发震断层,以区别于其他一些由于地震地面运动而造成的断层。构造地震常常发生在已有的断层上,这是因为这些地方既是应力集中的地方,又是岩石强度低的地方^[1]。由于岩石的断裂往往不是沿一个平面发展,而是形成了由一系列裂缝组成的破碎地带,沿整个破碎地带的岩石不可能同时达到平衡。因此,在一次强震(即主震)之后,由于岩石的变形还有不断的零星调整,往往还会产生一系列小震(即余震)。

近年来从获得的地震记录和地震所伴生的地壳变动进行分析,有些学者认为,地震的成因是地下某地区因受到外来的力而破坏,亦即应力使地层面的两侧发生错移运动,形成断层,产生地震。从断层运动的种类来看,又分为正断层(图 1.3(a))、逆断层(图 1.3(b))以及横向断层(图 1.3(c))。1999 年 9 月 21 日发生的中国台湾集集大地震的现场可以清晰地看到上述三种断层的实际震害情况。

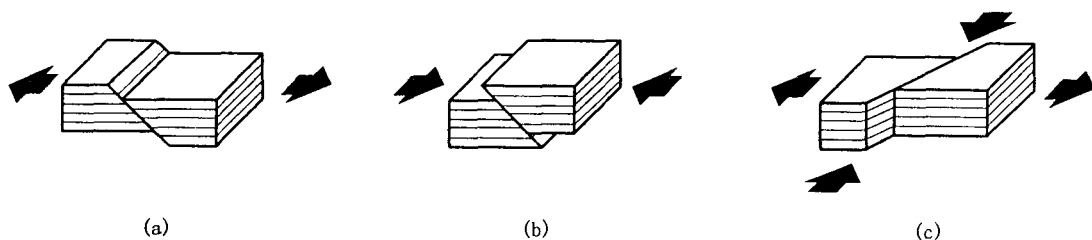


图 1.3 断层运动的种类

(a)正断层;(b)逆断层;(c)横向断层

关于地应力的产生有多种学说,其中比较公认的是板块构造学说。该学说的大意是:地球最上层厚度为 70~100km 的岩石层不是一块整体,而是由若干板块组成,即六大板块(欧亚板块、太平洋板块、澳洲板块、美洲板块、非洲板块和南极板块)和若干小板块。由于岩石层下面的地幔软流层的对流运动使各板块相互运动。由于各板块之间的边界是相互制约的,因而板块之间产生了作用力(拉力、压力和剪力),从而产生了地应力。地球上的主要地震带就处在这些大板块的交界处。

由于火山爆发,岩浆猛烈冲击地面时引起的地面振动叫做火山地震,火山地震的影响一般比较小,不致引起较大的灾害。

由于地表或地下岩层因某种原因(如较大的地下溶洞的塌陷或古旧矿坑的塌陷等)突然造成大规模陷落和崩塌时导致小范围内的振动叫塌陷地震,塌陷地震造成的危害一般也比较小。

上述地震中,构造地震发生的次数最多,约占全世界地震总数的 90%。构造地震释放的能量最多,造成的灾害最大,尤以浅源构造地震造成的灾害更大。因此,从工程抗震角度来说,构造地震是我们最主要的研究对象。

1.2 地震波

地震引起的振动以波的形式从震源向各个方向传播,这就是地震波。地震波是震源辐射的弹性波,一般分为体波和面波。体波是纵波和横波的总称,包括原生体波和各种折射、反射及其转换波。面波为次生波,一般指乐甫(Love)波和瑞雷(Rayleigh)波。下面分别介绍这两种波的主要特性。

1.2.1 体波

体波是指通过地球本体内传播的波,它包含纵波与横波两种。

纵波是由震源向外传递的压缩波或疏密波,质点的振动方向与波的前进方向一致,如图 1.4(a)所示,一般表现出周期短、振幅小的特点。纵波的传播过程是介质质点间弹性压缩与张拉变形相间出现、周而复始的过程,因此,纵波在固体、液体里都能传播。声波就是一种纵波。横波是由震源向外传递的剪切波,质点的振动方向与波的前进方向垂直,如图 1.4(b)所示,一般表现为周期长、振幅较大的特点。由于横波的传播过程是介质质点不断受剪变形的过程,因此横波只能在固体介质中传播。

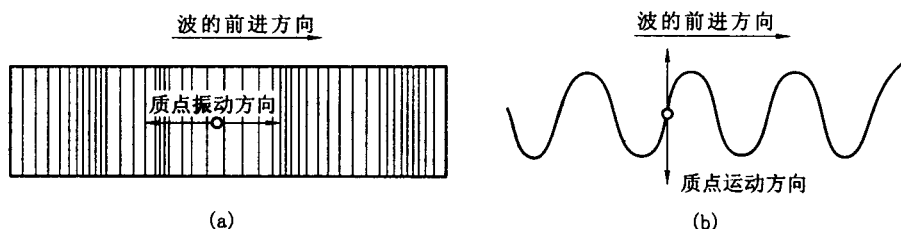


图 1.4 体波传播示意图

(a)压缩波;(b)剪切波

纵波与横波的传播速度理论上可分别用下式计算:

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\gamma)}{\rho(1+\gamma)(1-2\gamma)}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (1.1)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\gamma)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.2)$$

式中 v_p ——纵波速度;

v_s ——横波速度;

E ——介质的弹性模量;

γ ——介质的泊松比;

ρ ——介质的密度;

G ——介质的剪切模量;

λ ——拉梅常数, $\lambda = \frac{\gamma E}{(1+\gamma)(1-2\gamma)}$ 。

在弹性介质中,这两种体波的传播速度之比为:

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1-\gamma)}{1-2\gamma}} \quad (1.3)$$

一般情况下,式(1.3)的值大于1,例如当 $\gamma=0.25$ 时(对于地壳中的大多数岩石可取该值), $v_p=\sqrt{3}v_s$ 。因此纵波传播速度比横波传播速度要快,在仪器观测到的地震记录图上,一般也是纵波先于横波到达。因此,通常也把纵波叫P波(Primary wave),把横波叫S波(Secondary wave)。体波在地球内部的传播速度随深度的增加而增大,如图1.5所示^[2]。

通过式(1.1)、式(1.2)和式(1.3),不仅可以得到两种体波的传播速度和它们之间的关系,还可以得到介质的一些弹性参数。例如,当实际测得 v_p 和 v_s 时,利用式(1.3)可以得到介质的泊松比 γ ;在介质密度 ρ 已知的情况下,在 $(E,G),(\gamma,\lambda),(v_p,v_s)$ 这三组参数中,若已知其中一组,利用式(1.1)、式(1.2)、式(1.3)就可以求得其他两组参数,这些参数在地震工程的研究与应用中是非常重要的。

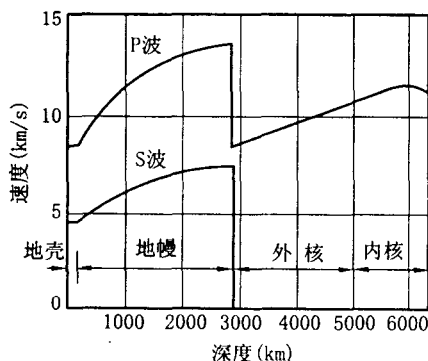


图 1.5 体波在地球内传播速度的变化

1.2.2 面波

面波是指沿介质表面(或地球表面)及其附近传播的波,一般可以认为是体波经地层界面多次反射形成的次生波,它包含瑞雷波和乐甫波两种。与体波相比,面波的振幅大、周期长、速度慢、衰减慢,能传播到很远的地方。在距离震中近的地方,面波的成分较少,随着震中距离的增加,面波的成分增加。

地震瑞雷波是纵波P和横波S在固体层中沿界面传播相互叠加的结果。瑞雷波的振动轨迹如图1.6所示。瑞雷波传播时,质点在波的传播方向与地表面法向组成的平面内做逆进椭圆运动,如图1.7(a)所示。瑞雷波在震中附近并不出现,要离开震中一段距离才形成,而且其振幅沿径向按指数规律衰减。

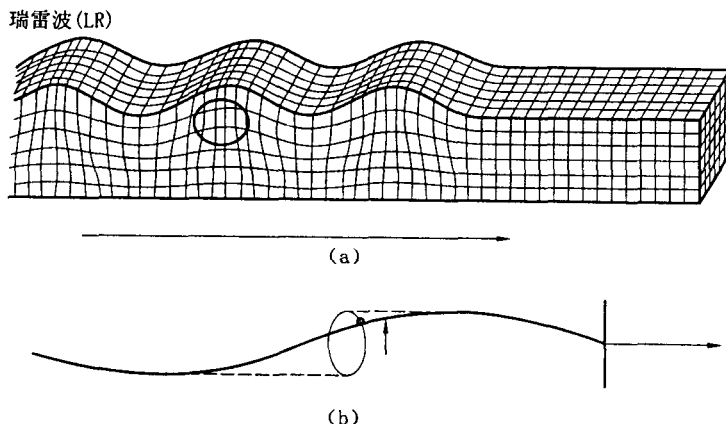


图 1.6 瑞雷波振动轨迹

(a)剖面;(b)射线

乐甫波的形成与波在自由表面的反射和波在两种不同介质界面上的反射、折射有关。乐甫波的传播,类似于蛇行运动,质点在与波传播方向相垂直的水平方向作剪切型运动,如图 1.7(b)所示。质点在水平向的振动与波行进方向耦合后会产生水平扭转分量,这是乐甫波的一个重要特点。

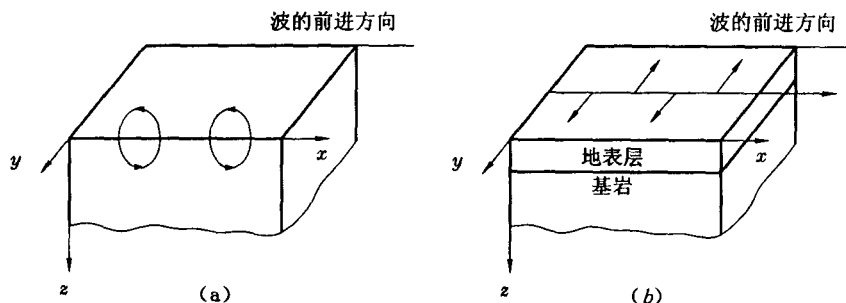


图 1.7 面波质点振动示意图

(a)瑞雷波质点振动;(b)乐甫波质点振动

地震波的传播以纵波最快,横波次之,面波最慢。所以在地震记录上,纵波最先到达,横波到达较迟,面波在体波之后到达,当横波或面波到达时地面振动最强烈。一般认为,纵波使建筑物产生上下颠簸,横波使建筑物产生水平摇动,而面波则使建筑物既产生上下颠簸又产生水平摇动,其中横波和面波产生的水平振动是导致建筑物破坏的主要因素。

地震波记录是确定地震发生的时间、震级和震源位置的重要依据,也是研究工程结构物在地震作用下的实际反应的重要资料。

1.2.3 地震观测及地震波的主要特性

由震源释放出来的地震波传到地面后引起地面运动,地面运动的位移、速度和加速度可以用仪器记录下来。观测记录地震动的仪器称为地震仪。早在公元 132 年,我国东汉科学家张衡发明了世界上第一台地震仪——候风地动仪,放置在当时的京城洛阳,开创了人类用仪器记录地震的先河。近代的地震仪则出现于 18 世纪 80 年代,一般包括拾振器(传感器)、放大器和记录装置三个部分。拾振器通常是一个具有一定自振周期和阻尼的单自由度振子,选择适当的参数再配备积分和微分装置后可以记录位移、速度和加速度。传统的地震仪主要采用模拟记录,各个台站独立进行记录,但可按统一时标进行分析。进入 20 世纪 80 年代后出现了由不同频带的记录仪器组成的多点记录、有线和无线传输的数字化地震台网。

用地震仪记录到的地面运动的位移、速度或加速度随时间变化的时程曲线习惯上又称为地震位移波形、速度波形和加速度波形。在地震波的特性中,对工程抗震有重要意义的量是地震波的最大幅值(强度或峰值)、频谱特性和持续时间,通常被称为地震波的三要素。

1. 地震波的最大幅值

最大幅值是描写地震地面运动强烈程度的最直观的参数,尽管用它来描写地震波的特性时还存在一些问题,但在工程实际中得到最普遍的接受与应用。在抗震设计中对结构进行时程反应分析时,往往要给出输入的最大加速度峰值,在设计用反应谱中,地震影响系数的最大值也与地面运动最大加速度峰值有直接的关系(见第 3 章)。通过对大量强震地震动记录的研

究,发现地震波的最大幅值主要受到下列因素的影响:震源机制、震级、震中距、地震的传播途径、介质和局部的地质条件。

2. 地震波的频谱特性

地震波的幅值大小往往不能对震害作出全面解释。人们通过大量震害调查发现,在有些地震中地震波的加速度幅值很大但震害很小,相反,在有些地震中地震波的加速度幅值很小但震害却很严重。如在 1962 年的墨西哥地震中,距离震中约 400km 的墨西哥市记录的地震波的加速度最大幅值仅为 0.05g,但震害十分严重。因此,除地震波的最大幅值外,地震波的其他特性也与工程结构的震害有关。

通过对时域的地震波进行变换,就可以了解地震波的频谱特性,频谱特性可以用功率谱、反应谱和傅里叶谱来表示。本书不再说明这些谱的有关理论和方法,仅对一些研究结果作一介绍。图 1.8 和图 1.9 是根据日本一批强地震记录求得的功率谱,它们是同一地震、震中距近似相同而地基类型不同的情况,显示出硬土、软土的功率谱成分有很大不同,即软土地基上地震加速度波形中长周期分量比较显著;而硬土地基上地震加速度波形则包含着多种频谱成分,一般情况下短周期的分量比较显著。利用这一概念,在设计结构物时,人们就可以根据地基土的特性,采取刚柔不同的体系,以减少地震引起结构物共振的可能性,减少地震造成的破坏。

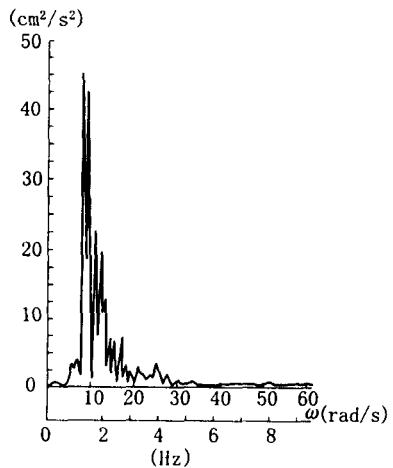


图 1.8 软土地基功率谱示意图

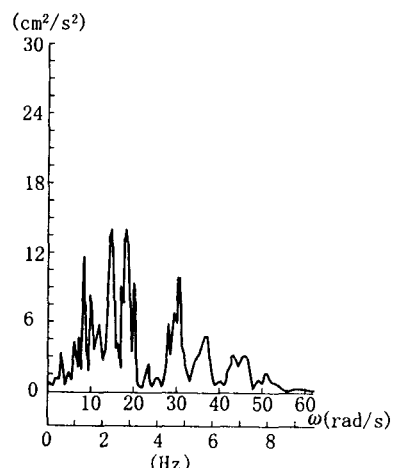


图 1.9 硬土地基功率谱示意图

3. 地震波的持续时间

人们很早就从震害经验中认识到了强震持续时间对结构物破坏的重要影响,很多结构在地震初始阶段虽然变形很大,但没有倒塌,而随着持续时间的增加或在余震中倒塌了,并且认识到了这种影响主要表现在结构物开裂以后的阶段(即结构的非线性反应阶段)。在地震地面运动的作用下,一个结构物从开裂到全部倒塌一般是有一个过程的,如果结构物在开裂后又遇到了一个加速度峰值很大的地震脉冲,并且结构物产生了很大的变形,那么结构的倒塌与一般的静力试验中的现象比较相似,即倒塌取决于最大变形反应。另一种情况是,结构物从开裂到倒塌,往往要经历几次、几十次甚至几百次的反复振动过程,在某一振动过程中,即使结构最大变形反应没有达到静力试验条件下的最大变形,结构也可能由于长时间的振动和反复变形而发生倒塌破坏(由于结构的累积损伤)。很明显,在结构发生开裂后,连续振动的时间越长,结构的累积损伤越大,则结构倒塌的可能性就越大。因此,地震地面运动的持续时间成为人们研

究结构物抗倒塌性能的一个重要参数。在抗震设计中对结构物进行非线性时程反应分析时, 往往也要给出一个输入地震波的持续时间。

1.3 地震震级与地震烈度

1.3.1 地震震级

地震震级是表征地震强弱的指标, 是地震释放多少能量的尺度, 它是地震的基本参数之一, 常用来衡量地震的大小或规模, 是地震预报和其他有关地震工程学研究中的一个重要参数。

震级一般有三种定义: 近震震级 M_L 、面波震级 M_S 和体波震级 M_B 。

近震震级的最早定义由美国的里克特(C. F. Richter)给出, 计算近震震级 M_L 的公式为:

$$M_L = \lg A - \lg A_0 \quad (1.4)$$

式中 A ——地震记录的最大幅值;

A_0 ——标准地震在同一震中距上的最大振幅。

如果 $A=A_0$, 则 $M_L=0$ 。里克特规定: 用标准地震仪(周期 0.8s, 阻尼系数 0.8, 放大倍数 2800 倍), 在震中距 100km 处, 记录最大振幅的地动位移为 10^{-3} mm ($1\mu\text{m}$), 相应的震级为零级。 $-\lg A_0$ 是震中距的函数, 是零级地震在不同震中距的振幅对数值, 称作起算函数或标定函数。

中国的李善邦将近震震级的定义发展为采用一般的近震记录, 建议按下式确定震级:

$$M_L = \lg A_\mu + R(\Delta) \quad (1.5)$$

式中 A_μ ——近震记录的最大地动位移(μm), 取两水平向分量的算术平均值, 两水平向分量不必追踪同一时间的振幅;

$$R(\Delta) = \lg V_0(T) - \lg A_0 - 3 \quad (1.6)$$

其中 $V_0(T)$ ——标准地震仪在最大振相周期 T 时的放大倍数;

A_0 ——与式(1.4)中的定义相同。

中国规定面波震级 M_S 按下式确定:

$$M_S = \lg(A/T) + \sigma(\Delta) + C \quad (1.7)$$

式中 A ——面波最大地动位移(μm), 取两水平向分量的矢量和;

T ——相应于 A 的周期;

$\sigma(\Delta)$ ——起算函数;

C ——台站校正值。

由于随着震源深度的加大, 面波迅速减弱, 故深源地震时难以用面波测定震级。为了测定深源地震的震级, 古登堡推广为使用体波。对于体波震级, 目前中国仍采用古登堡和里克特的方法, 按下式计算:

$$M_B = \lg(A/T) + Q + S \quad (1.8)$$

式中 A ——地震体波波组的最大振幅(μm), 对水平向分量则采用两水平向分量的矢量和;

T ——相应于 A 的周期;

Q ——体波起算函数;

S——台站校正值。

以上介绍了三种计算震级的方法,理论上讲,同一地震中得到的 M_L 、 M_S 和 M_B 应该相同,但实际上观测结果表明各种震级间有系统偏差。根据国内外资料求得的经验公式如下:

$$M_S = 1.13M_L - 1.08 \quad (1.9)$$

$$M_B = 0.63M_S + 2.5 \quad (1.10)$$

中国地震部门为统一起见,规定全部用面波所计算的震级 M_S 上报。

由于地震震级本身只反映地震某些方面的参数,再加上震源与观测台站之间地震波经过的介质有差异,以及近震、面波、体波震级之间的折算也有差异,故同一地震,所报的震级有一定的差异也是正常的。震级的大小直接与震源释放的能量有关,震级每差一级,地震释放的能量相差 32 倍之多。

一般来说,小于 2 级的地震人们感觉不到,只有仪器才能记录下来,叫作微震;2~4 级地震人就感觉到了,叫有感地震;5 级以上地震就要引起不同程度的破坏,统称为破坏性地震;7 级以上地震则称为强烈地震。

1.3.2 地震烈度

地震烈度是表示某一区域范围内地面和各种建筑物受到一次地震影响的平均强弱程度的一个指标,主要根据宏观的地震影响和破坏现象,如从人们的感受、物体的反应、建筑物的破坏和地面现象的改观(如地形、地质、水文条件的变化)等方面来判断。这一指标反映了在一次地震中一定地区内地震动多种因素综合强度的总平均水平,是地震破坏作用大小的一个总评价。为了对地震区进行抗震设防,就需要研究预测该地区在今后一定时期内的地震烈度,作为工程抗震设计的依据。

为了用地震烈度来表示地震影响的程度,需要有评定烈度的具体标准,该标准就称为地震烈度表。历年来世界各国陆续编制和修订了几十种烈度表,目前除了日本采用 8 度(0~7 度)划分、少数欧洲国家采用 10 度划分的烈度表外,绝大多数国家包括中国普遍采用 12 度划分的烈度表。

我国于 1957 年首次颁布了地震烈度表,该烈度表是根据我国地震调查的经验、建筑特点和历史资料并参照国外的烈度表编制的。在对该烈度表进行修订后,1980 年又颁布了新的地震烈度表,目前使用的烈度表则是 1999 年颁布的烈度表。1999 年烈度表继承了 1980 年烈度表的基本内容,只是对不同烈度的现象表述作了一些修订。表 1.1 是 1999 年颁布的中国地震烈度表。该烈度表以统一的尺度衡量地震的强烈程度,从无感到地面剧烈变化及山河改观划分为 12 个等级。关于该表中各烈度划分的说明如下:

(1)1~5 度以人的感觉为主;6~10 度以房屋震害为主,人的感觉仅作参考;11、12 度以房屋和地表现象为主。

(2)在高楼上人的感觉要比地面上人的感觉明显,应适当降低评定值。

(3)表中房屋为单层或数层、未经抗震设计或未加固的砖混或砖木房屋。对于质量特别差或特别好的房屋,可根据具体情况,对表中各烈度相应的震害程度和震害指数予以提高或降低。

(4)震害指数是从各类房屋的震害调查和统计中得出的反映破坏程度的数字指标,0 表示无震害,1 表示倒平,中间按轻重分级,平均震害指数为各级震害指数与相应破坏率(%)乘积

的总和。

表 1.1 1999 年中国地震烈度表

烈度	在地面上人的感觉	房屋震害程度		其他现象	物理参量	
		震害现象	平均震害指数		峰值加速度 (cm/s ²)	峰值速度 (cm/s)
1	无感					
2	室内个别静止中的人有感觉					
3	室内少数静止中的人有感觉	门、窗轻微作响		悬挂物微动		
4	室内多数人、室外少数人有感觉,少数人梦中惊醒	门、窗作响		悬挂物明显摆动,器皿作响		
5	室内普遍、室外多数人有感觉,多数人梦中惊醒	门窗、屋顶、屋架颤动作响,灰土掉落,抹灰出现微细裂缝;有檐瓦掉落,个别屋顶烟囱掉砖		不稳定器物摇动或翻倒	31 (22~44)	3 (2~4)
6	站立不稳,少数人惊逃户外	损坏——墙体出现裂缝,檐瓦掉落,少数屋顶烟囱裂缝、掉落	0~0.1	河岸和松软土上出现裂缝,饱和砂层出现喷砂冒水;有的独立砖烟囱轻度裂缝	63 (45~89)	6 (5~9)
7	大多数人惊逃户外,骑自行车的人有感觉;行使中的汽车驾乘人员有感觉	轻度破坏——局部破坏、开裂,小修或不需修理可继续使用	0.11~0.30	河岸出现塌方,饱和砂层常见喷砂冒水;松软土地上地裂缝较多;大多数独立砖烟囱中等破坏	125 (90~177)	13 (10~18)
8	多数人摇晃颠簸,行走困难	中等破坏——结构破坏,需要修复才能使用	0.31~0.50	干硬土上亦有裂缝;大多数独立砖烟囱严重破坏;树梢折断;房屋破坏导致人畜伤亡	250 (178~353)	25 (19~35)
9	行动的人摔倒	严重破坏——结构严重破坏,局部倒塌,修复困难	0.51~0.70	干硬土上有许多地方出现裂缝;基岩可能出现裂缝、错动;滑坡塌方常见;独立砖烟囱出现倒塌	500 (354~707)	50 (36~71)
10	骑自行车的人会摔倒,处于不稳状态的人会摔出,有抛起感	大多数倒塌	0.71~0.90	山崩和地震断裂出现;基岩上的拱桥破坏;大多数独立砖烟囱从根部破坏或倒毁	1000 (708~1414)	100 (72~141)
11		普遍倒塌	0.91~1.0	地震断裂延续很长,大量山崩滑坡		
12				地面剧烈变化,山河改观		

(5)震害程度

- 损坏——个别掉砖落瓦,墙体微细裂缝,指数 0~0.1;
- 轻度破坏——局部破坏开裂,但不妨碍使用,指数 0.11~0.30;
- 中等破坏——结构受损,需要修理,指数 0.31~0.50;
- 严重破坏——墙体裂缝较宽,局部倒塌,修复困难,指数 0.51~0.70;
- 倒塌——大部分倒塌,不堪修复,指数 0.71~0.90;
- 毁灭——墙倒顶塌,荡然无存,指数 0.91~1.0。

(6)凡有地面强震记录资料的地方,表中的物理参量可作为综合评定烈度和制订建设工程抗震设防要求的依据。

(7)在农村可以自然村为单位,在城镇可以分区进行烈度的评定,但面积以 1km² 左右为宜。

(8)表中数量词的含义为:个别指 10%以下;少数指 10%~50%;多数指 50%~70%;大多数指 70%~90%;普遍指 90%以上。

国际上目前使用的主要地震烈度表还有:①修订的麦卡利烈度表(Modified Mercalli Scale,MMS),主要为美国、加拿大和拉丁美洲国家所采用。②MSK 烈度表,由麦德维捷夫、施蓬怀尔和卡尔列克于 1964 年共同提出,主要在前苏联和欧洲一些国家使用。③日本气象厅烈度(JMA),1949 年由日本气象厅制订,适合于日本国情,在日本使用。④欧洲 98 版地震烈度表(EMS-98),欧洲地震委员会在 MSK 烈度表的基础上修订形成的,该烈度表包含了对新建筑结构影响的考察,不但考虑了不同类型建筑结构的破坏程度,而且还考虑了建筑本身的易损性,另外,赋予描述性语言以明确的定量含义,增加了烈度评定的客观性及可操作性,该烈度表已逐步成为烈度评定的国际标准。

1.3.3 震级与震中烈度的关系

地震震级和地震烈度是完全不同的两个概念。地震震级近似表示一次地震释放能量的大小,地震烈度则是经受一次地震时一定地区内地震影响强弱程度的总评价。如果把地震比作一次炸弹爆炸,则炸弹的药量就好比震级;炸弹对不同地点的破坏程度就好比是烈度。一次地震只有一个震级,但一次地震对不同地点的影响不同,烈度亦随地而异。一般距离震中越远,地震影响越小,烈度就越低,反之亦然。在一次地震中,在其所波及的范围内用烈度表可以对每一个地点评估出一个烈度,烈度相同点的外包线称为等震线,如前图 1.2 所示。

震中烈度则是震级与震源深度的函数。在环境条件基本相同的情况下,震级越大,震源深度越浅,则震中烈度越高。对于浅源地震,震中烈度与震级大致成如下式表示的经验关系:

$$M = 0.58I_0 + 1.5 \tag{1.11}$$

地震震级与震中烈度大致的对应关系如表 1.2 所示。

表 1.2 地震震级与震中烈度大致关系

地震震级(M)	2	3	4	5	6	7	8	8 以上
震中烈度(I ₀)	1~2	3	4~5	6~7	7~8	9~10	11	12