

工程结构

抗震与防灾技术研究

GONGCHENG JIEGOU KANGZHEN YU FANGZAI JISHU YANJIU

王玉镯 高英 曹加林 著

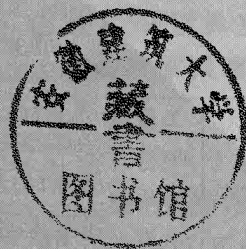


中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

工程结构抗震与防灾技术研究

王玉镯 高英 曹加林 著



中国建筑工业出版社
en

内 容 提 要

本书以结构抗震为主,系统梳理了建筑结构各种体系抗震设计的内力计算、技术措施和构造,同时阐述了结构抗风和抗火等方面的内容。主要内容包括:结构抗震基本知识、结构抗震概念设计、结构抗震计算、混凝土结构房屋抗震设计、砌体结构房屋抗震设计、钢结构房屋抗震设计、结构隔震和消能减震设计、桥梁结构抗震设计、结构抗风设计、结构抗火计算与设计等。

图书在版编目(CIP)数据

工程结构抗震与防灾技术研究 / 王玉镗, 高英, 曹加林著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2018.1
ISBN 978-7-5170-6222-6

I. ①工… II. ①王… ②高… ③曹… III. ①建筑结构—抗震设计—研究②工程结构—防护结构—结构设计—研究 IV. ①TU352.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 326765 号

责任编辑:陈洁

封面设计:王伟

书 名	工程结构抗震与防灾技术研究 GONGCHENG JIEGOU KANGZHEN YU FANGZAI JISHU YANJIU
作 者	王玉镗 高 英 曹加林 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net(万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010)68367658(营销中心), 82562819(万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市同力彩印有限公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 14.5 印张 256 千字
版 次	2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	58.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

地震灾害具有突发性和毁灭性,特大地震在瞬时就能对工程结构造成十分严重的破坏,使人民生命财产蒙受巨大的损失。2008年5月12日我国汶川地震造成了大量的人员伤亡和建筑结构破坏。震后的灾害调查使我们获得了很多的防震害经验,也使我们对各类结构的抗震性能有了进一步认识。我国是一个地震多发的国家,大部分城镇和村庄均位于设防烈度在6度以上的抗震设防区,在目前无法准确预报地震的前提下,对工程结构进行必要的抗震设计是减轻地震灾害积极有效的措施。

近几年,世界上抗震水平比较先进的国家如美国、日本、欧洲、新西兰等,先后完成了抗震规范修订工作。为了认真总结震害经验和有关科研成果,吸收国外抗震规范的优点,我国于2010年也完成了抗震设计规范的修订。新发布的《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010局部修订)(以下简称规范修订)对提高建筑工程抗震设防能力,保护人民生命财产安全具有重要意义。本书就是以此规范为依据撰写的,详细探究了建筑结构抗震减震的设计原理与具体方法。

全书共10章,主要包括结构抗震基本知识、结构抗震概念设计、结构抗震计算、混凝土结构房屋抗震设计、砌体结构房屋抗震设计、钢结构房屋抗震设计、结构隔震和消能减震设计、桥梁结构抗震设计、结构抗风设计、结构抗火计算与设计。

作者希望读者通过本书的学习,不仅能基本掌握工程结构抗震方面的基本理论和基本方法,而且能熟练运用规范进行各类建筑结构的抗震设计。

本书在撰写过程中参考和引用了国内外近年来正式出版的有关建筑结构抗震的规范、著作、文献等,在此向有关作者表示诚挚的谢意。由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,欢迎读者批评指正。

作 者

2017年9月

目 录

前言

第 1 章 结构抗震基本知识	1
1.1 地震的成因	1
1.2 地震波及其传播	2
1.3 地震的烈度、活动性及地震灾害	7
1.4 结构的抗震设防	14
1.5 抗震设计的基本要求	16
第 2 章 结构抗震概念设计	21
2.1 建筑场地的选择	21
2.2 建筑形体与结构规则性	22
2.3 抗震结构选型	29
2.4 结构延性的利用	32
2.5 非结构构件的抗震	33
第 3 章 结构抗震计算	37
3.1 单自由度体系的弹性地震反应分析	37
3.2 多自由度弹性体系的地震反应分析	46
3.3 竖向地震作用计算	53
3.4 结构抗震验算	55

第 4 章	混凝土结构房屋抗震设计	58
4.1	混凝土框架结构抗震设计	58
4.2	混凝土抗震墙结构抗震设计	74
4.3	混凝土框架—抗震墙结构抗震设计	78
第 5 章	砌体结构房屋抗震设计	86
5.1	多层砌体房屋的震害及其分析	86
5.2	多层砌体房屋抗震设计的一般要求	88
5.3	多层砌体房屋的抗震验算	93
5.4	多层砌体房屋抗震构造措施	101
第 6 章	钢结构房屋抗震设计	118
6.1	钢结构房屋的震害及其分析	118
6.2	钢结构房屋抗震计算	121
6.3	钢结构房屋抗震构造措施	129
第 7 章	结构隔震和消能减震设计	138
7.1	结构隔震与消能减震概述	138
7.2	结构隔震设计	139
7.3	结构消能减震设计	143
第 8 章	桥梁结构抗震设计	164
8.1	桥梁震害及其分析	164
8.2	桥梁结构的抗震计算	166
8.3	桥梁结构的抗震设计	168
第 9 章	结构抗风设计	177
9.1	结构抗风设计基本流程与方法	177
9.2	高层建筑抗风设计	184

9.3	高耸结构抗风设计	188
9.4	大跨度屋盖结构抗风设计	193
9.5	改善结构抗风性能的措施	195
第 10 章	结构抗火计算与设计	197
10.1	结构抗火设计的一般原则与方法	197
10.2	钢—混凝土组合梁抗火性能与设计方法	201
10.3	钢框架结构整体抗火性能计算方法	216
参考文献	225

第1章 结构抗震基本知识

强烈地震在瞬息之间就可以对地面上的建筑物造成严重破坏。现代科技的发展,虽能对地震的发生进行预测,但准确地预报何时、何地、将发生何种强度的地震目前是很困难的,因此对抗震与减震进行研究是非常有必要的。

1.1 地震的成因

根据地震形成原因的不同,地震可分为四大类,具体如图 1-1 所示。

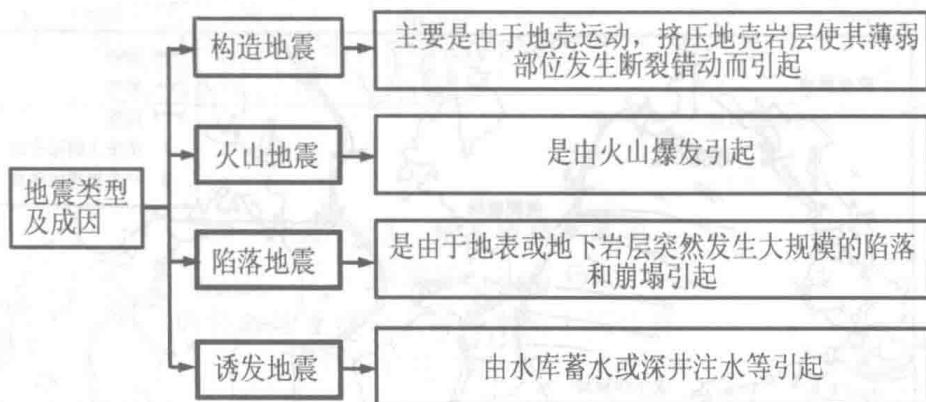


图 1-1 地震的类型及成因

在这四种类型的地震中,构造地震分布最广、危害最大,占地震总量的 90% 以上;虽然火山地震造成的破坏性也较大,但在我国不常见;其他两种类型的地震一般震级较小,破坏性也不大。

用来解释构造地震成因的最主要学说是断层说和板块构造说。

断层说认为,组成地壳的岩层时刻处于变动状态,产生的地应力也在不停变化。当地应力较小时,岩层尚处于完整状态,仅能发生褶皱。随着作用力不断增强,当地应力引起的应变超过某处岩层的极限应变时,该处的岩层将产生断裂和错动(图 1-2)。而承受应变的岩层在其自身的弹性应力作用下将发生回跳,迅速弹回到新的平衡位置。一般情况下,断层两侧弹性回跳的方向是相反的,岩层中构造变动过程中积累起来的应变能,在回弹过程中得以释放,并以弹性波的形式传至地面,从而引起地面的振动,这就是地震。

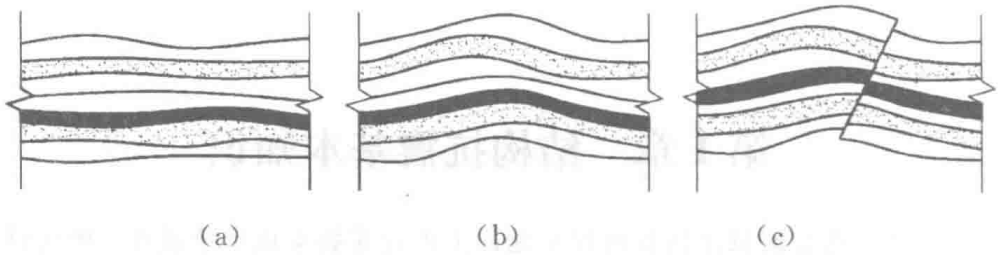


图 1-2 地壳构造变动与地震形成示意图

(a)岩层原始状态;(b)受力后发生褶皱变形;(c)岩层断裂产生振动

如图 1-3 所示,地球的表面岩的六大板块并不是静止不动的,它们之间相对缓慢地进行运动,两两交界处会发生相对挤压和碰撞,从而致使板块边缘附近岩石层脆性断裂而引发地震。地球上大多数地震就发生在这些板块的交界处,从而使地震在空间分布上表现出一定的规律,即形成地震带。

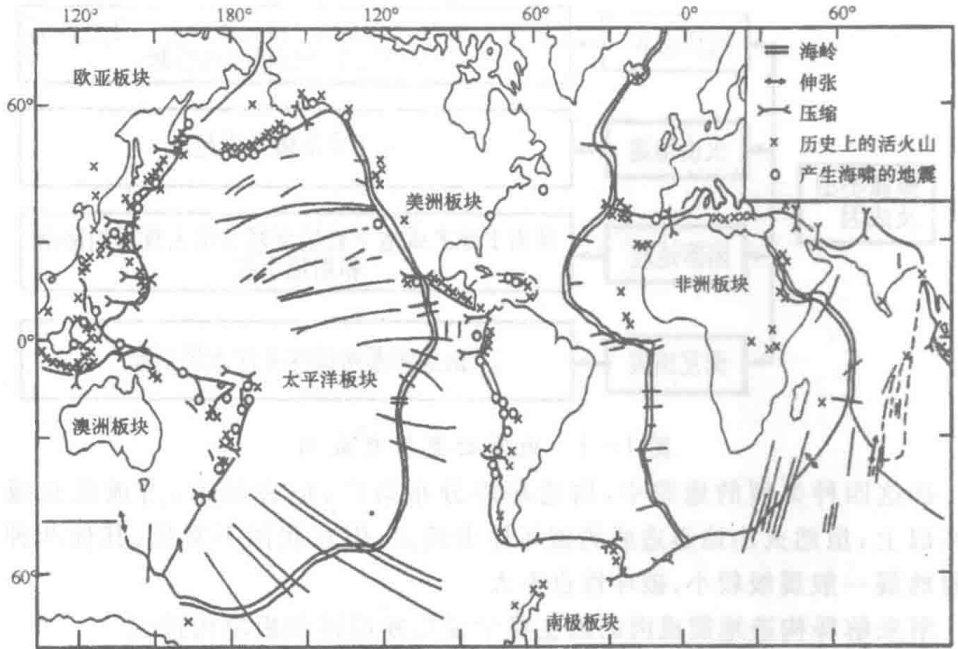


图 1-3 板块的分布

1.2 地震波及其传播

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,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。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。

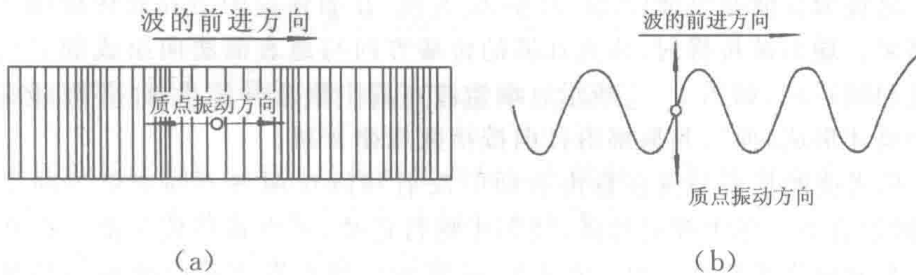


图 1-4 体波传播示意图

(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 为纵波速度; v_S 为横波速度; E 为介质的弹性模量; γ 为介质的泊松比; ρ 为介质的密度; G 为介质的剪切模量; λ 为拉梅常数, $\lambda = \frac{\gamma E}{(1+\gamma)(1-2\gamma)}$ 。

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, $v_P = \sqrt{3} v_S$ 。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,通常也把纵波叫作 P 波(Primary Wave),把横波叫作 S 波(Secondary Wave)。

通过式(1-1)~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)可以得到介质的波松比 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)和式(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。

1.2.2 面波

面波是指沿介质表面(或地球地面)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。

地震瑞雷波是纵波(P波)和横波(S波)在固体层中沿界面传播相互叠加的结果。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1-5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。

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1-6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。

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,一般当横波或面波到达时,地面振动最强烈。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。

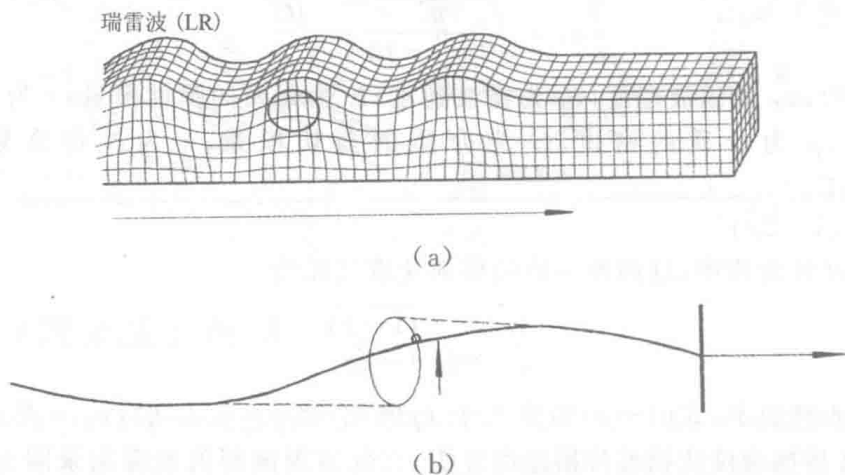


图 1-5 瑞雷波振动轨迹剖面 and 射线

(a) 振动轨迹剖面; (b) 射线

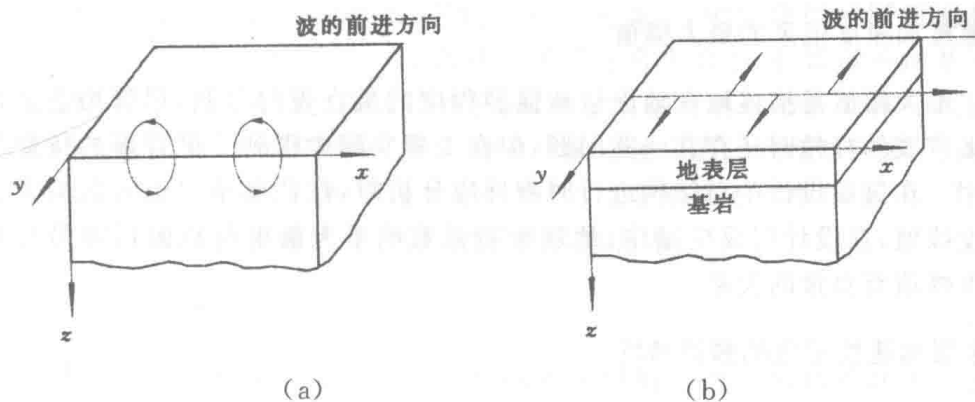


图 1-6 面波质点振动示意图
(a)瑞雷波质点振动;(b)乐甫波质点振动

1.2.3 地震波的主要特性及其在工程中的应用

由震源释放出来的地震波传到地面后引起地面运动,这种地面运动可以用地面上质点的加速度、速度或位移的时间函数来表示,用地震仪记录到的这些物理量的时程曲线习惯上又称为地震加速度波形、速度波形和位移波形。我国在 2008 年 5 月 12 日汶川地震中记录到的加速度时程曲线如图 1-7 所示,这是我国近年来记录到的最有价值的地震地面运动记录之一。在目前的结构抗震设计中,常用到的则是地震加速度记录,下面就地震加速度记录的一些特性作简单的介绍。

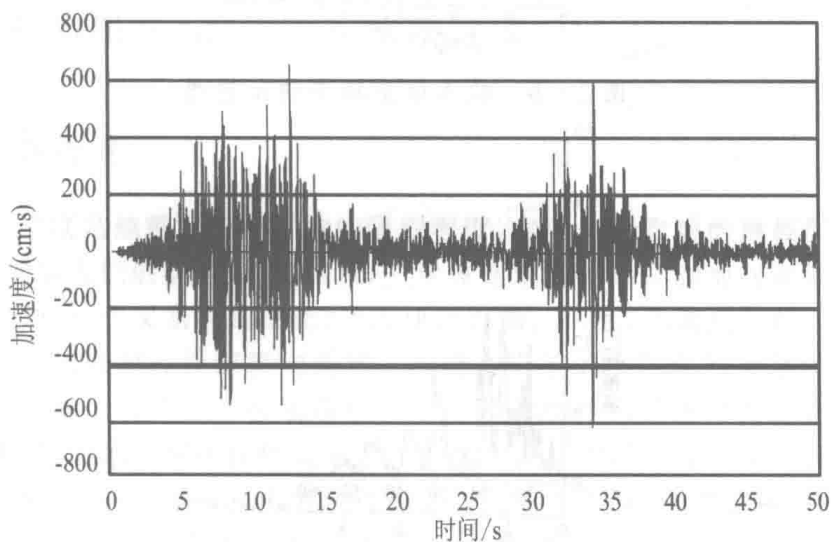


图 1-7 汶川地震中记录到的加速度时程曲线

1. 地震加速度记录的最大幅值

最大幅值是描述地震地面运动强烈程度的最直观的参数,尽管用它来描述地震波的特性时还存在一些问题,但在工程实际中得到了最普遍接受与应用。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。

2. 地震加速度记录的频谱特性

对时域的地震加速度波形进行变换,就可以了解这种波形的频谱特性。频谱特性可以用功率谱、反应谱和傅立叶谱来表示。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

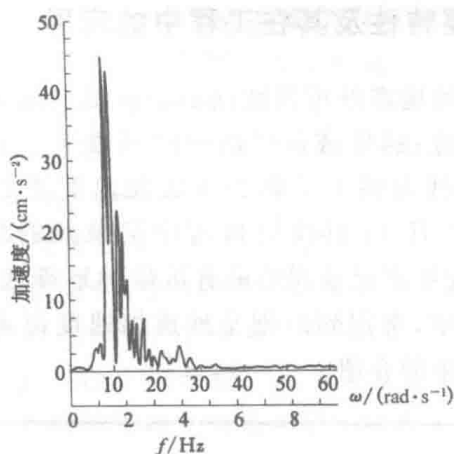


图 1-8 软土地基功率谱示意图

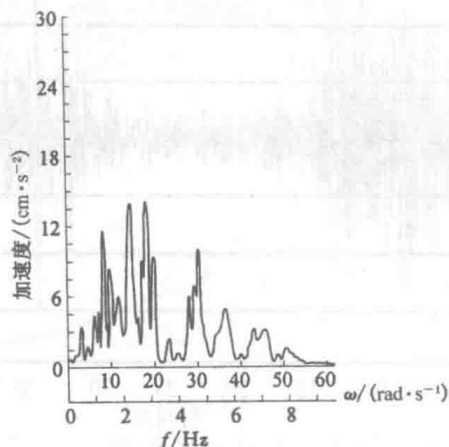


图 1-9 硬土地基功率谱示意图

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。

3.地震加速度记录的持续时间

人们很早就从震害经验中认识到强震持续时间对结构物破坏的重要影响,并且认识到这种影响主要表现在结构物开裂以后的阶段。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。很明显,在结构已发生开裂时,连续振动的时间越长,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加速度记录的持续时间。

1.3 地震的烈度、活动性及地震灾害

1.3.1 地震烈度

地震烈度是地震对地面影响的强烈程度,主要依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、房屋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。因此,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。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。地震烈度把地震的强烈程度,从无感到建筑物毁灭及山河改观等划分为若干等级,列成表格,以统一的尺度衡量地震的强烈程度。表1-1是2008年颁布的中国地震烈度表。

表 1-1 中国地震烈度(2008 年)

地震烈度	人的感觉	房屋震害			其他震害现象	水平向地震动参数	
		类型	危害程度	平均震害指数		峰值加速度 / ($m \cdot s^{-2}$)	峰值速度 / ($m \cdot s^{-2}$)
I	无感	—	—	—	—	—	—
II	室内个别静止中的人有感觉	—	—	—	—	—	—
III	室内少数静止中的人有感觉	—	门、窗轻微作响	—	悬挂物微动	—	—
IV	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	—	—
V	室内绝大多数、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,个别房屋墙体抹灰出现细微裂缝,个别屋顶烟囱掉砖	—	悬挂物大幅度晃动,不稳定器物摇动或翻倒	0.31 (0.22~0.44)	0.03 (0.02~0.04)
VI	多数人站立不稳,少数人惊慌逃户外	A	少数中等破坏,多数轻微破坏和/或基本完好	0.00~0.11	家具和物品移动;河岸和松软土出现裂缝,饱和砂层出现喷砂冒水;个别独立砖烟囱轻度裂缝	0.63 (0.45~0.89)	0.06 (0.05~0.09)
		B	个别中等破坏,少数轻微破坏,多数基本完好				
		C	个别轻微破坏,大多数基本完好	0.00~0.08			

续表

地震烈度	人的感觉	房屋震害			其他震害现象	水平向地震动参数	
		类型	危害程度	平均震害指数		峰值加速度 / $(m \cdot s^{-2})$	峰值速度/ $(m \cdot s^{-2})$
Ⅶ	大多数人户外, 骑自行车的人有感觉, 行驶中的汽车驾乘人员有感觉	A	少数毁坏和/或严重破坏, 多数中等和/或轻微破坏	0.09~0.31	物体从架子上掉落; 河岸出现塌方, 饱和砂层常见喷水冒砂, 松软土地上地裂缝较多; 大多数独立砖烟囱中等破坏	1.25 (0.90~1.77)	0.13 (0.10~0.18)
		B	少数中等破坏, 多数轻微破坏和/或基本完好				
		C	少数中等和/或轻微破坏, 多数基本完好	0.07~0.22			
Ⅷ	多数人摇晃颠簸, 行走困难	A	少数毁坏, 多数严重和/或中等破坏	0.29~0.51	干硬土上出现裂缝, 饱和砂层绝大多多数喷砂冒水; 大多数独立砖烟囱严重破坏	2.50 (1.78~3.53)	0.25 (0.19~0.35)
		B	个别毁坏, 少数严重破坏, 多数中等和/或轻微破坏				
		C	少数严重和/或中等破坏, 多数轻微破坏	0.20~0.40			
Ⅸ	行动的人摔倒	A	多数严重破坏和/或毁坏	0.49~0.71	干硬土上多处出现裂缝, 可见基岩裂缝、错动, 滑坡、塌方常见; 独立砖烟囱多数倒塌	5.00 (3.54~7.07)	0.50 (0.36~0.71)
		B	少数毁坏, 多数严重和/或中等破坏				
		C	少数毁坏和/或严重破坏, 多数中等和/或轻微破坏	0.38~0.60			

地震烈度	人的感觉	房屋震害			其他震害现象	水平向地震动参数	
		类型	危害程度	平均震害指数		峰值加速度 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	峰值速度 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
X	骑自行车的人会摔倒, 处不稳状态的人会摔离原地, 有抛起感	A	绝大多数毁坏	0.69~0.91	山崩和地震断裂出现, 基岩上拱桥破坏; 大多数独立砖烟囱从根部破坏或倒毁	10.00 (7.08~14.14)	1.00 (0.72~1.41)
		B	大多数毁坏	0.58~0.80			
		C	多数毁坏和/或严重破坏				
XI	—	A	绝大多数毁坏	0.89~	地震断裂延续很大, 大量山崩滑坡	—	—
		B		1.00			
		C		0.78~1.00			
XII	—	A	几乎全部毁坏	1.00	地面剧烈变化, 山河改观	—	—
		B					
		C					

注: ①表中房屋包括以下 3 种类型:

A 类——木构架和土、石、砖墙建造的旧式房屋。

B 类——未经抗震设防的单层或多层砖砌体房屋。

C 类——按照Ⅶ度抗震设防的单层或多层砖砌体房屋。

②表中给出的“峰值加速度”和“峰值速度”是参考值, 括弧内给出的是变动范围。

1.3.2 地震活动性

1. 世界地震活动性

据统计, 地球每年平均发生 500 万次左右的地震, 其中 5 级以上的破坏性地震约占 1000 次, 而绝大多数地震由于发生在地球深处或者释放的能量小, 人们难以感觉到, 需要用非常灵敏的仪器才能测量到。目前世界上记录到的最大地震是 1960 年 5 月 22 日发生在智利的 8.9 级大地震。

破坏性地震并不是均匀地分布于地球的各个部位。根据地震的历史资料, 将地震发生的地点和强度在地图上标记出来, 绘制成震中分布图。在地球上震中的分布是沿一定深度和规律地集中在某些特定的大地构造部位, 总