

建筑工程教学辅导丛书

混凝土结构

(二) 高层建筑结构抗震设计

北方交通大学

滕家禄 奚毓堃 主编

中国建筑工程工业出版社



37
6

建筑工程教学辅导丛书

混凝土结构

(二)

高层建筑结构抗震设计

北方交通大学

滕家禄 奚毓堃 主编

中国建筑工业出版社

(京) 新登字 035 号

建筑工程教学辅导丛书是供工业与民用建筑专业的学生、教师和技术人员学习和讲授有关各专业课程而编写的。

本书以该专业混凝土结构及建筑结构抗震两门课程为基础,专门针对钢筋混凝土高层建筑结构抗震设计中的重点和难点进行系统阐述,并适当介绍一些国内外近年的发展情况,使读者开扩思路。对于《建筑抗震设计规范》(GBJ11-89)中所反映的我国抗震结构设计的研究成果进行详细论述,对一般教材中未列出的公式来源也作了补充推导。书中还编入了钢筋混凝土框架房屋抗震计算实例,可供实习设计辅导参考。

本书还可供土建设和施工人员参考。

建筑工程教学辅导丛书

混凝土结构

(二)

高层建筑结构抗震设计

北方交通大学

滕家禄 奚毓堃 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市顺义板桥印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14¹/₂ 字数: 334 千字

1997 年 1 月第一版 1997 年 1 月第一次印刷

印数: 1—3,000 册 定价: 19.00 元

ISBN 7-112-03015-3

TU·2305 (8130)

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

本书是建筑工程教学辅导丛书之一。书中内容按丛书的宗旨，为便于对教科书的重点和难点进行比较深入系统的阐述，并对高层建筑抗震设计领域的新发展作适当介绍，采用专题的方式编写。内容力求和教材密切配合，互相衔接，便于在教学过程中参考。

我国现行《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89)，主要是根据 1978 年的《工业与民用建筑抗震设计规范》及其以前公布的各种规范版本，不断地吸取历次大地震、尤其是 1976 年唐山大地震的震害经验，以及国内外地震工程研究重大成果编订成的规范。具体地体现了“小震不坏、中震可修、大震不倒”这一抗震设计原则，并制定出一系列相应的概念设计、构造要求和计算方法。采用的抗震设计方法中，较好地把握政策性、科学性、先进性、经济性和实用性等结合在一起。

现行规范突出的一点是采用了三个设防水准、二阶段的抗震设计方法，对于保证建筑物抗震性能方面，力求提高建筑物抗御罕遇大地震作用下不倒塌的能力。本书的各个专题将对教材和规范中有关的规定、内容和方法，给出相应的解释和说明。其中包括地震特性、场地与场地土、多遇小震地震作用下各类结构截面抗震承载力验算，高层钢筋混凝土结构房屋在罕遇大震下寻找薄弱层和薄弱层弹塑性层间变形抗倒塌验算方法，以及防御罕遇大震下房屋倒塌为目标的各种抗震构造措施等。

我们希望这本书能对学生的学业有所帮助，同时对从事钢筋混凝土结构设计和施工人员也有参考价值。

本书的编写人员及其分工为：

第 1. 2. 3. 4. 5 章—奚毓堃、谷钧宏。

第 6. 7. 8. 9 章—滕家禄、张晓锋、张金强。

框架房屋抗震设计实例—谷钧宏、张金强。

在编写过程中，曾得到汪一骏、陈维纯、吴庆荪等同志的指导和帮助，在此致以深切谢意。

编写这类性质的书，我们是第一次，经验不足，书中错误和不妥之处在所难免，希望广大读者提出批评和改进意见，以便再版时修改。

目 录

第1章 地震工程基本知识及抗震设计目标	1
1.1 地震工程的一些知识	1
1.1.1 地震成因	1
1.1.2 震源、震中、震级	1
1.1.3 地震波	1
1.2 地震地面运动特性	2
1.2.1 场地土卓越周期	2
1.2.2 典型的强震记录地面运动情况	4
1.3 地面运动特征参数	6
1.3.1 幅值	7
1.3.2 频谱	7
1.3.3 持续时间	8
1.4 地震烈度	9
1.4.1 地震烈度的含义	9
1.4.2 基本烈度	9
1.4.3 基本烈度的概率标定	10
1.5 抗震设计目标	11
1.5.1 三水准抗震设计目标	11
1.5.2 两阶段设计	11
1.5.3 建筑重要性分类	12
1.6 地震的破坏作用	13
1.6.1 表土层的影响	13
1.6.2 结构刚度的影响	14
第2章 场地、地基和基础	15
2.1 概述	15
2.2 场地选择	16
2.2.1 各类地段的划分	16
2.2.2 不利地段	17
2.2.3 危险地段	18
2.3 建筑场地类别	18
2.3.1 宏观震害现象	19
2.3.2 覆盖土层厚度	20
2.3.3 场地土类型	20
2.3.4 土层剪切波速实测法	22
2.3.5 场地类别划分简化方法	22
2.3.6 桩基、深基础能否改变场地类别	24

2. 4	地基基础抗震验算	24
2. 4. 1	地基基础震害的宏观调查	24
2. 4. 2	地基基础抗震验算	25
2. 5	场地土的液化	26
2. 5. 1	饱和砂土液化的原因及其主要震害现象	26
2. 5. 2	砂土液化的宏观经验	27
2. 5. 3	饱和土层液化的判断	27
2. 5. 4	液化地基危害程度的评定	30
2. 5. 5	抗液化措施	32
第 3 章	结构地震反应分析	34
3. 1	概述	34
3. 2	地震作用计算方法简介	34
3. 2. 1	静力法	34
3. 2. 2	底部剪力法	35
3. 2. 3	振型分解反应谱法	35
3. 2. 4	时程分析法	35
3. 2. 5	能量分析法	35
3. 3	反应谱分析	36
3. 3. 1	反应谱的基本概念	36
3. 3. 2	反应谱的计算	37
3. 3. 3	设计反应谱	38
3. 4	多质点弹性体系的地震反应	44
3. 4. 1	振型分解反应谱法	44
3. 4. 2	基本周期的计算	45
3. 5	规范中水平地震作用的计算	47
3. 5. 1	底部剪力法水平地震作用计算	47
3. 5. 2	振型分解反应谱法水平地震作用计算	49
3. 6	竖向地震作用	51
3. 6. 1	概述	51
3. 6. 2	竖向地震动分析	51
3. 6. 3	结构竖向振动分析	52
3. 6. 4	竖向地震作用简化计算方法	53
3. 6. 5	竖向地震作用的特点	54
3. 6. 6	其他结构构件竖向地震作用	55
第 4 章	时程分析法	56
4. 1	概述	56
4. 2	时程分析法的概念	57
4. 3	结构振动的力学计算模型	58
4. 3. 1	层模型	58
4. 3. 2	杆模型	60
4. 3. 3	单柱框架模型	60
4. 4	恢复力特性	61
4. 4. 1	双线型	62

4. 4. 2	三线型	62
4. 4. 3	杆件恢复力特性参数	63
4. 5	阻尼矩阵	64
4. 6	地震波的选用	65
4. 7	动力方法数值积分方法	66
4. 8	时程分析法设计步骤	67
4. 9	层间剪切型弹塑性动力方程	67
4. 9. 1	弹性刚度	68
4. 9. 2	弹塑性刚度	68
4. 9. 3	动力方程刚度矩阵	70
4. 10	平面杆系模型的弹塑性动力方程	70
4. 10. 1	平面框架的弹性静力平衡方程	71
4. 10. 2	平面框架的弹性动力方程	74
4. 10. 3	平面框架的弹塑性分析	75
第5章 考虑扭转效应的振动分析		80
5. 1	引起房屋扭转的因素	80
5. 2	静力偏心距法	80
5. 2. 1	单层房屋	81
5. 2. 2	多层房屋	83
5. 2. 3	偏心距法的修正	83
5. 3	刚性楼盖多层房屋的平扭耦联振动分析	84
5. 3. 1	刚性楼盖多层房屋的计算假定	84
5. 3. 2	串联刚片系的振动方程	85
5. 3. 3	振型和频率	86
5. 3. 4	运动的振型方程式	87
5. 3. 5	楼层地震作用值	89
5. 3. 6	考虑扭转的地震作用效应	90
5. 4	抗侧力构件任意方向布置时扭转效应的近似计算	91
5. 4. 1	主轴的概念	91
5. 4. 2	主轴方向	92
5. 4. 3	刚度中心	93
5. 4. 4	构件的地震剪力	93
5. 4. 5	近似计算步骤	94
第6章 结构体系和布置		95
6. 1	高层建筑结构设计特点	95
6. 1. 1	水平荷载是控制结构内力和变形的决定因素	95
6. 1. 2	考虑轴向变形和剪切变形对内力和位移的影响	96
6. 1. 3	结构的延性要求	97
6. 2	结构体系和典型布置	101
6. 2. 1	框架结构体系	101
6. 2. 2	剪力墙结构体系	103
6. 2. 3	框架—剪力墙结构体系	107
6. 2. 4	框架—筒体结构体系	110

6. 2. 5 筒体体系	111
6. 3 结构总体布置原则	114
6. 3. 1 高度、高宽比	114
6. 3. 2 平面要简单、对称、规则	115
6. 3. 3 立面变化要均匀、规则	117
6. 3. 4 防震缝的合理设置	119
6. 3. 5 足够的基础埋深	119
第 7 章 框架、剪力墙、框-剪结构的内力、位移计算	121
7. 1 内力、位移计算的一般原则	121
7. 1. 1 结构分析的弹性静力假定	121
7. 1. 2 平面结构假定	122
7. 1. 3 楼板在自身平面内刚性假定	123
7. 1. 4 水平荷载按位移协调原则分配	122
7. 2 框架在竖向荷载下的内力计算	123
7. 2. 1 二种近似分析法的简单比较	123
7. 2. 2 框架梁的惯性矩取值	124
7. 2. 3 竖向活荷载最不利分布的确定	124
7. 2. 4 竖向荷载下梁端弯矩的塑性调幅	126
7. 3 框架在水平荷载作用下的内力和位移计算—— D 值法	126
7. 3. 1 柱的抗侧刚度 D	127
7. 3. 2 柱的反弯点高度比	130
7. 3. 3 标准反弯点高度比 y_n	130
7. 3. 4 D 值法小结	134
7. 3. 5 水平荷载作用下框架侧移的近似计算与水平位移限值	135
7. 4 剪力墙分类及其判别式	139
7. 4. 1 剪力墙的分类	140
7. 4. 2 剪力墙的受力特点	140
7. 4. 3 剪力墙分类判别式	142
7. 5 剪力墙内力和位移计算公式汇总	144
7. 5. 1 整体墙计算公式	144
7. 5. 2 小开口整体墙计算公式	145
7. 5. 3 联肢墙计算公式	146
7. 6 框-剪结构的内力和位移计算	148
7. 6. 1 基本概念	148
7. 6. 2 实用设计计算步骤	150
7. 6. 3 有关内力和位移计算中的几个问题	151
第 8 章 结构抗震验算及构造措施	155
8. 1 三水准两阶段设计	155
8. 1. 1 两阶段设计	155
8. 1. 2 截面抗震验算	155
8. 1. 3 设计流程框图	157
8. 1. 4 结构抗震等级	158
8. 2 框架截面设计和构造	159

8. 2. 1	强度、变形双控设计	159
8. 2. 2	延性框架	160
8. 2. 3	框架梁柱相对强度及其延性要求	161
8. 2. 4	强柱弱梁	162
8. 2. 5	梁的抗震设计	163
8. 2. 6	柱的抗震设计	166
8. 2. 7	梁柱节点抗震设计	170
8. 2. 8	内力调整的实配系数	172
8. 3	剪力墙截面设计及构造	174
8. 3. 1	实体剪力墙抗震要求	174
8. 3. 2	影响剪力墙延性的各种因素	174
8. 3. 3	实体剪力墙的抗震设计	176
8. 3. 4	构造要求	178
8. 4	开洞剪力墙	180
8. 4. 1	开洞剪力墙抗震设计原则	181
8. 4. 2	洞口布置	183
8. 4. 3	特殊开洞墙	183
8. 4. 4	连梁截面设计及构造措施	184
第 9 章	结构抗震变形验算	187
9. 1	结构的变形控制	187
9. 1. 1	抗震设防标准	187
9. 1. 2	结构变形限制的规定	187
9. 2	弹塑性变形特性	188
9. 2. 1	薄弱层	188
9. 2. 2	影响薄弱层非线性变形集中的因素及规律	188
9. 2. 3	弹塑性变形简化算法	190
9. 3	框架结构楼层抗剪承载力的计算	193
9. 3. 1	强梁弱柱型框架	193
9. 3. 2	柱铰判别法	194
9. 3. 3	柱底塑性铰法	194
9. 3. 4	简化柱底塑性铰法	195
9. 4	结束语——抗震概念设计	195
9. 4. 1	预防为主、全面规划	196
9. 4. 2	选择抗震有利场地、避开抗震不利地段	196
9. 4. 3	规则建筑	196
9. 4. 4	多道抗震防线	196
9. 4. 5	防止薄弱层塑性变形集中	197
9. 4. 6	强度、刚度和变形能力的统一	197
9. 4. 7	确保结构的整体性	198
9. 4. 8	非结构构件的抗震措施	198
第 10 章	钢筋混凝土框架房屋抗震计算实例(基底剪力法)	200
参考文献		221

第1章 地震工程基本知识及抗震设计目标

1.1 地震工程的一些知识

为了能更有效地进行建筑结构的抗震设计以及更好地理解抗震规范的有关条款,需要了解一些有关的地震工程基本知识。

1.1.1 地震成因

地震按其成因通常可以分成三类:构造地震、火山地震和陷落地震。由于构造地震所产生的影响范围较广,破坏作用较强,发生频率较高,约占破坏性地震的90%以上。为此,一般建筑结构的抗震设计研究,是以构造地震为对象,来分析其对建筑的影响和破坏作用。

构造地震的形成,主要是由于地球内部作用使地壳的岩层处于复杂的地应力作用状态而积累一定的能量,与此同时随着地球内部运动不断的变化使某一岩层的应力超过其极限强度时,该处的岩体便发生突然的断裂和错动,这便形成地震。在这一过程中,由于岩体的破裂,解除了地应力的作用,释放了所积累的能量,并使产生了变形的岩体恢复原状而引起所谓“回弹”作用,便产生地震现象。伴随着构造地震的发生,释放的能量以波动的形式向周围扩散,传播到地面便形成地震地面运动。

1.1.2 震源、震中、震级

地震时,岩体发生剧烈的相对运动处称为震源。显然构造地震的震源是指在一定长度范围内的岩体破坏。震源正上方向相应的地面位置称震中。震源至震中的深度叫震源深度。地面某一地区到震中的距离则叫震中距。震级是表明发生的地震强弱程度和释放能量多少的等级。目前国际上以采用里氏震级来衡量地震的强弱等级较为普遍。

从地震对地面建筑物的影响来看,震级的大小对地面建筑物影响比较直观,震级愈大,它的影响和破坏作用就愈大。而震源位置,包括震源深度和震中距,对地面建筑物的影响也是抗震需要考虑的因素。一般情况下,同样的震级,震源浅的地震相对于震源较深的地震,对地面建筑物的影响和破坏作用要大。所以,地震的成因、震源的深浅、震级的大小等因素总称为震源机制,并作为对地面建筑物影响的因素之一。震中距是另一个影响因素,地震释放的能量向四周扩散,经过在岩土介质中的传递,使能量有所损耗。因此,一般来说,地震时,建筑物离震中愈近,所受的影响或破坏程度愈大;当震中距超过一定范围,可以认为建筑物不受该次地震的影响。

1.1.3 地震波

从震源发生的地震所释放的能量,以弹性波的形式向各个方向传播,通常把这种行波称为地震波。地球内部的地震波叫体波。体波含有P波和S波两种形式。

P波也称初始波、纵波或压缩波。这种波在介质内传播时,其质点振动方向与波的传播方向一致。因此,质点间的弹性相对位移必然是松紧交替,或者说是压缩与张拉轮流出现。由

于各种状态(固态、液态、气态)的介质,都可以承受不同程度的压缩与张拉,所以,纵波可以在所有介质中传播。

S波也叫次波、横波或剪切波。这种波在介质中传播时,质点的运动方向与波的前进方向正交。因此,相邻质点不可避免地产生往复的剪切位移,或者说两质点间承受着剪切作用而发生剪切变形。由于S波在传播过程中完全依赖介质的抗剪刚度,而液态和气态介质不能承受剪切作用,所以横波难以通过,只能在固体介质中传播。

地震波在传播过程中,由于通过介质时的反射和折射现象,当到达地表时,则变成相当复杂的波形。经过多次反射后的地震波,在传播到地面时即形成仅沿地面层状介质中传播的两种面波:R(瑞利)波和L(乐夫)波。

R波的质点运动仅限于在波的前进方向和地面法线方向所组成的平面内作椭圆运动;而L波则在地面上作水平方向的波动,呈蛇形运动的形式。

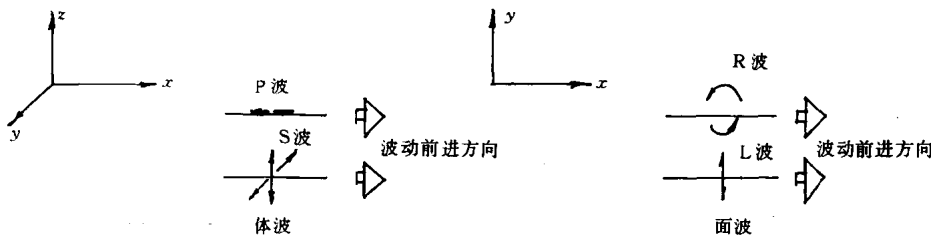


图 1-1 地震波类型

1.2 地震地面运动特性

一个地区的地震地面运动或称地震动,是从震源传来的地震波到达所在地区的基岩面,并输入基岩上部土层后传播到地表面的一种输出或反应。地震地面运动的性质,除了与土层的滤波和放大作用有关外,还与输入波的性质有很大的关系,场地的土层是一个非线性系统,随着输入波的强度的不同,其滤波和放大作用也不相同。因此,一个场地的地面运动性质是随震源机制、震级大小、震中距离和传播途径中土层的性质不同而变化。

作为建筑结构的抗震设计来说,一个场地的地震地面运动是抗震设计的前题和依据,不同特性的地震动对建筑物的影响和破坏作用是不一样的。但从现有科学水平很难预估将会发生的实际的地震大小,相应地也就很难预估设计建筑所在场地的地面运动情况。所以,只能根据历次地震的震害教训以及已取得的强震记录,考虑对建筑物破坏的影响,对地震地面运动的特性进行研究分析。

1.2.1 场地土卓越周期

许多震害现象表明,场地的周期特性对建筑物震害的程度有重要影响。最为明显的例子是1970年3月28日土耳其格迪兹(Gediz)地震中,某工厂的一幢现代化钢筋混凝土结构发生倒塌的现象。而同一工厂内建在同一场地土上的相近建筑,不管具有较短的周期($T=0.25s$)或具有较长周期($T=2.5s$),都没有破坏。从场地记录到的余震加速度分析,在周期 $T=1.2s$ 处有着明显的最大反应,而倒塌建筑的基本周期为 $T=1.25s$ 。经过大量的理论分析和试验研究之后,证实这幢建筑物具有一定的强度,且符合当时的规范规定。倒塌的唯一原

因是由于场地土和结构周期明显的一致而发生的共振。

根据地震波理论分析的结果表明,当地震波在传播过程中,由速度大的地层向速度小的地层行进时,由于波的周期要保持不变,一个周期内的波的前进距离则将缩短,振幅将增大。特别是使每个波中所含的能量保持不变,短波长的波要传输同样的能量,则必须增大振幅。一般来说,地表地层的地质年代较轻、传播地震波速低。因此,地震波由硬、深的地层向软、浅地层传播到达地表时,其振幅将增大很多。这就是场地土层的放大作用。当表层地基土层越软或软弱地基沉积层越厚,放大效应就愈大。

通常地基是由具有不同特性的多层土组成。当由下入射的大小和周期不同的波群进入多层土的表层时,多土层的表层土相当于一个“滤波器”,会将某些频率波群放大或通过,而将另一些波衰减或滤掉。由于各土层的“滤波”效应不同,因此,多层土的周期并不是单一的。

按弹性波理论分析,当地震波中某个谐波分量的周期 T 恰好等于该波穿过土层厚度 d_{ov} 所需时间的 4 倍时,其覆盖层地面振动将最为显著。一般将这个周期称为场地的卓越周期。

对于只有一层土的覆盖层时卓越周期为:

$$T = \frac{4d_{ov}}{v_s} \tag{1-1}$$

当为多层土时其覆盖层的卓越周期

$$T = \frac{4d_{ov}}{v_{sm}} \tag{1-2}$$

$$v_{sm} = \frac{d_{ov}}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}} \tag{1-3}$$

式中 d_{ov} ——覆盖层厚度;
 v_s ——土层剪切波速;
 v_{sm} ——土层平均剪切波速;
 d_i, v_{si} ——节 i 层土的厚度和剪切波速。

工程上,另一个求场地土的卓越周期方法是采用常时微振。常时微振的主要周期和按理论分析求得的场地卓越周期数值接近。

抗震规范根据实际钻孔,以某层剪切波速大于 500m/s 的土层,看做为“基岩”,并将其深度定义为覆盖层厚度,分别计算了 77 个数据的剪切波速。结果发现,若将 v_{sm} 以 160m/s 为界分成两组,则卓越周期值与覆盖层厚度有着良好的相关性。回归分析结果如图 1-2。

该结果表明,覆盖层厚度是影响层状土动力特性的重要因素之一。

通过上述讨论,可以了解到地震波由深层基岩向表土层传播过程中,存在着放大效应。由于多层土的周期不是单一的,当波动的周期等于场地土的卓越周期,覆盖的

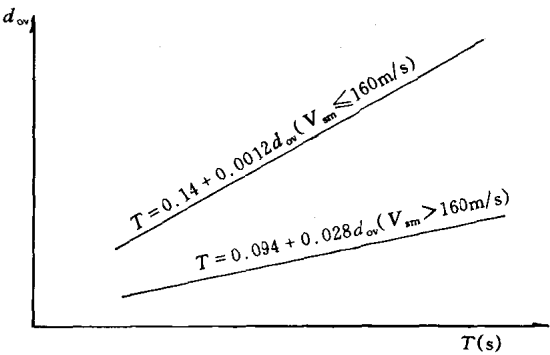


图 1-2 层状土卓越周期与覆盖层厚度的统计关系

表土层的振动将最显著。场地土的卓越周期除震源、震中距等影响因素外,还与表层土的性质和厚度有关。

以弹性波理论分析求土层的卓越周期的方法,属于线弹性范围的。以常时微动测定土层的卓越周期,因土层是微小振动,其变形是在弹性范围内,故其振动特征应属于弹性变形。对于大地震来说,土层已进入非线性状态,当采用上述二种方法求出的卓越周期作为地震时的特征,显然有其不妥之处。为此,有人对场地土的卓越周期一直持有不同的看法,认为其结果只能作为一种参考。

从地震记录可以清楚地看出,一个场地的地面运动,一般均存在着一个破坏性最强的主振周期,如果建筑物的自振周期与这个周期接近,建筑物的破坏程度就会加重。地震动称这个主导周期为地震动卓越周期,它是根据地震时某一地区地面运动记录计算出地震反应的主峰位置所对应的周期。震害调查表明,建筑物的自振周期与地震动卓越周期相等或接近时,建筑物的震害有明显的加重趋势。因此,在进行建筑抗震设计时,要估计该建筑所在场地的地震动卓越周期;然后,使设计的建筑自振周期错开卓越周期,尽量加大两者之间的差距。

要正确预测地震动卓越周期是很难做到的,然而某一工程场地的地震动卓越周期,尽管随震级大小和震中距远近而变化;但因与该场地的场地条件特别是场地土性质存在着某种相关性,可以利用场地周期来估计地震动卓越周期。所以场地土卓越周期是地震地面运动的动力特性之一。当地震动卓越周期与该地基土的固有自振周期一致,则将使地表面的振动幅度大大增加。当地震波中占优势的波动分量的周期与建筑物固有周期相近,建筑物将受到非常大的地震作用。

1.2.2 典型的强震记录地面运动情况

1. 单次脉冲型 如图 1-3 所示的地震记录曲线,这类地震的震级不大(5.4~6.2 级),震源深度较浅(不到 30km),周期较短(小于 0.2s),仅出现在离震中很近的坚硬土壤上。一次冲击的破坏性效应几乎是单方向的。

2. 中等持续时间不规则的运动 这类地震最为普遍,相应于中等震中距与坚硬土层上的地震。如图 1-4 所示为 1940 年 El-centro 地震记录是这类地震的典型实例。从平均来看,在一个很宽的振动周期范围内(大约 0.05~0.5 和 2.5~6s 之间)能量是均布的。通常这类运动几乎在所有方位上具有同等的强烈程度。这类地震地面运动频带较宽,有一开始逐步增强再减弱趋于零的过程。开始阶段高频分量较多,相当于 P 波,最后阶段低频分量较明显。三个阶段频率的高低、时间的长短、加速度峰值的大小,对各次地震是不同的。

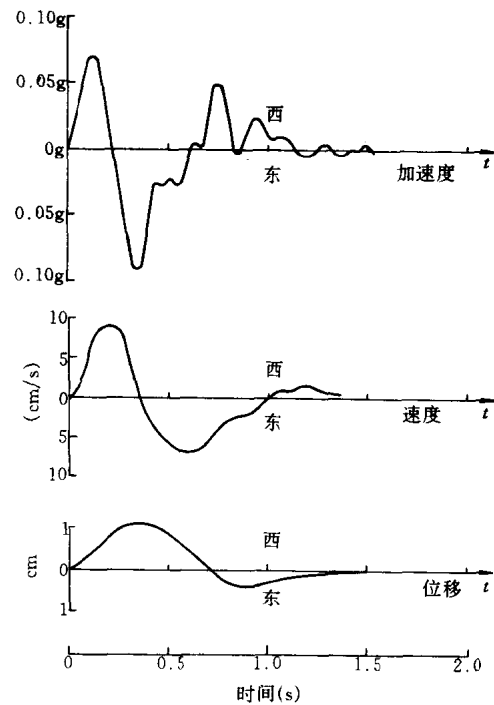


图 1-3 休耐姆(Hoeneme)港地震东西向分量

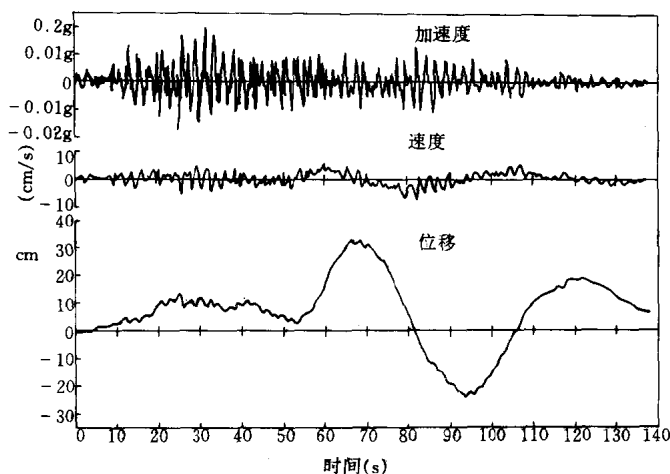


图 1-4 加州埃尔生特罗(Elcentro)地震,南北向分量

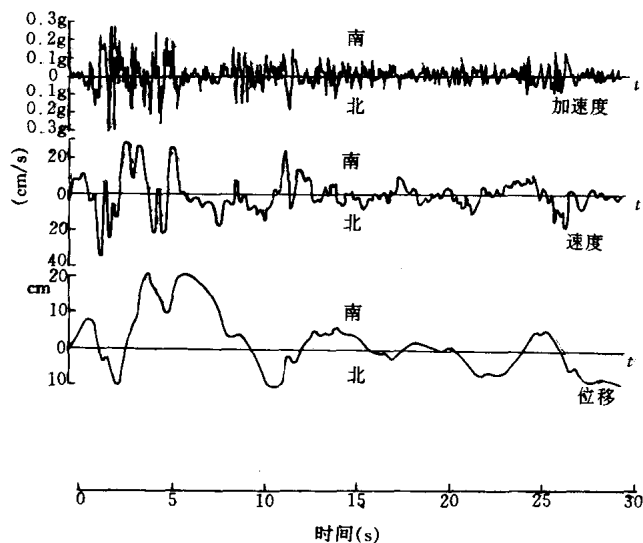


图 1-5 墨西哥城地震南北向分量

3. 有显著卓越周期、且持续时间长的地面运动 这类地震动一般是在远离震中的软土层上可以测录到。为说明这类地震,图 1-5 表示了 1964 年墨西哥城地震时所取得地震记录。这类地震频带也较宽,规律与第二类地震相似,但地震动的卓越周期较长(约 2.2s)。这主要是由于这一类型的地震动,是由前一类型的地震通过软土层的滤波以及在覆盖层的界面处使波的逐次反射所形成的。

4. 具有土层大变形的地面运动 这类地震出现滑坡、土的液化。地震记录在土层变形前后有明显的不同特点。如图 1-6 的新泻地震记录就属于此类。

从上述四种类型的地面运动记录来说,建筑物的地震破坏和倒塌大致可划分为两类:一是由于地基失效所致,如第四类地震记录,在极不稳定土层上,发生如砂土液化、土层滑坡和断层破裂等。另一类是由结构自身振动而造成的破坏,如上述第一、二、三类强震记录的地震

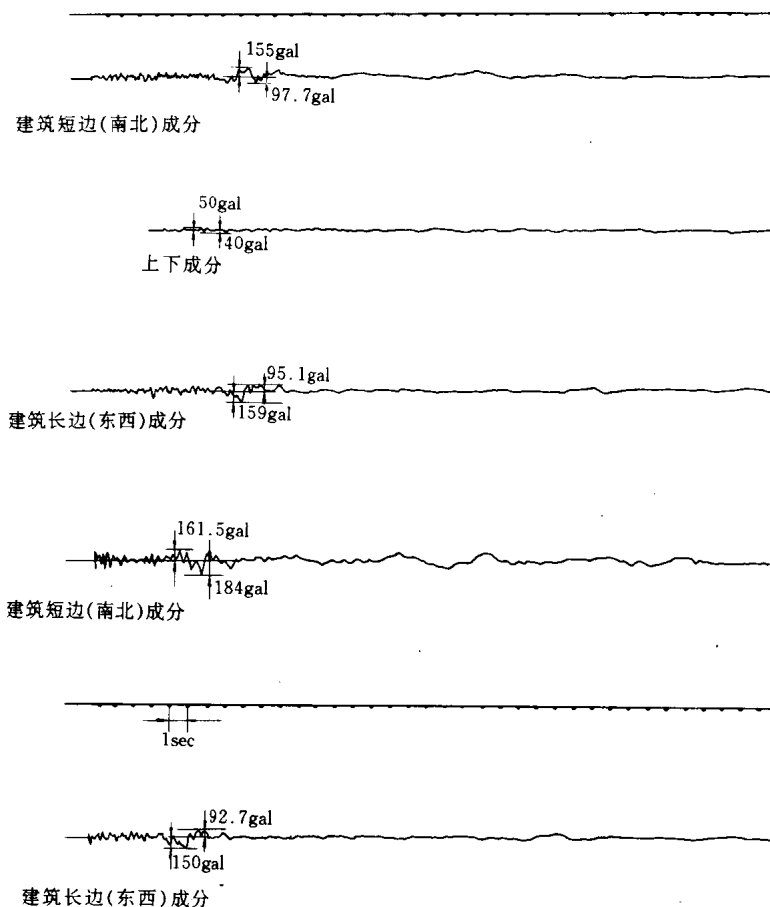


图 1-6 日本新泻地震记录

动使结构产生的振动。

第四类地震动不论从分析或模拟研究都很困难,同时设想将一个结构设计成能抗御大规模地面破坏而结构不遭损坏是不实现的。因此,在抗震设计的处理上,对于这类场地,重点是正确判定可能发生这类情况的条件,进而确定是否更改建设场地或者进行地基处理。

目前,我们所进行的抗震设计,通常集中研究第一、二、三类地震地面运动。其中把主要注意力放在第二类地面运动上,原因是这类地面运动发生率高,可利用的记录多,并容易模拟或分析简单结构上的反应。第一类地震,波形较简单,有可能用确定性方法处理,目前唯一的困难是现有记录不足。第三类地震运动是从第一类或第二类运动的线性滤波取得,因此,分析方法可类似于上两类。

1.3 地面运动特征参数

为了分析强震记录中对工程应用有重要意义的特征,一般采用幅值、频谱和持续时间三个参数来反映强震记录的地面运动的特征。

1.3.1 幅值

地面运动的振动幅值可用所记录的地面运动加速度、速度、位移三者之中任意一个的峰值来表示。

最早认识到地面运动的幅值是加速度的峰值,因为从牛顿第二定律出发,认为最大加速度可以作为地震动强弱的标志。这也是当时在结构设计时,从静力学的概念出发,以力的作用大小来衡量的必然结果。后来发展为用地震动最大速度作标志,认为地震动的强弱与能量有关,而质点的动能是 $\frac{1}{2}mv^2$ 。这种以单个因素作为地震动强弱标志的思想主要目的在于把地震动看作是一个简单的物理量。

由于地震动加速度很早就被看作是表示地震强弱的量,因此对地震最大加速度是研究最多的。当所给的加速度过程是按不等时间间距给出的,则峰点与谷点加速度均被取值,所以最大加速度值是真实的。如加速度过程是按等时间间距 0.02s 修正后给出的,则常常不能给出真实的最大加速度值。这种地震动最大值的误差,是由于等间距取值所致。另一误差是由于强震仪自身的高频失真所致。现有仪器只能不失真地记录到周期大于 0.06s 左右的振动。对于周期小于 0.04s 左右的振动有严重的失真现象。而加速度最大值与地震动的高频振动分量的关系极为密切,所以最大加速度值的误差也将存在。两种误差,一般来说前者可采取一些措施进行改正,仪器失真现象今后恐将继续存在。

1.3.2 频谱

频谱的概念就是一次地震动中振幅与频率的关系曲线。

随着强震加速度过程记录的积累,人们就像了解声波、光波和电波一样,明确了地震动频谱特性的重要性,不考虑频谱不可能了解振动现象。

人们早就知道结构物有其自振频率,假若地震动的频率,经过频谱分析得出强震记录中占主导地位的频率集中于低频,它将引起自振周期长的结构产生巨大的反应;相反,若地震动的卓越周期在高频段,则对刚性结构物会造成大的危害。这就是上一节研究表层土的卓越周期引起的所谓共振效应。

到 70 年代,人们又进一步认识到地震动的频谱组成是随场地土壤条件而改变。宏观震害现象以及强震记录说明,震级愈大、震中愈远、场地土愈软而厚,则频谱的长周期成分越突出。由于地震动频谱是随地震震级大小、震中距远近,以及场地土层的软硬和厚薄而变的,所以不同自振周期的建筑结构在相同的条件下会产生不同程度的震害。例如 1966 年 10 月 17 日秘鲁地震时的利马市震害主要集中于单层房屋,而多层房屋几乎无破坏,当时的利马市强震记录明显表明地震动的频谱是以高频为主,主周期为 0.1s,而单层房屋自振周期正好接近 0.1s。又如 1957、1962 和 1985 年三次墨西哥地震,在离震中很远,震中距为 200~300km 的墨西哥市,高层建筑的震害重于低层房屋,这一震害现象与该城市取得的地震动记录分析是一致的,表明地震动是以长周期成分为主,1s 与 2s 左右的周期很丰富,容易引起高层建筑的共振效应,虽然地震动的最大加速度仅为 0.05g,却足以造成高层建筑严重震害。

从频谱分析可以了解到地震地面运动所记录的一些频带较宽和波形复杂的地震动中,占主导地位的波动周期。当地面运动中占优势的波动分量的周期与建筑物的基本周期相近时,将使建筑物产生共振现象而遭到较大破坏。因此,进行频谱分析,研究频谱变化的特征及其对结构的影响,具有很重要的工程价值。地震工程中常用的频谱有傅里叶谱、反应谱和功

率谱。

1.3.3 持续时间

持续时间是地震动三特性之一,在近一、二十年已被大多数地震工程学家所承认。这是由于强震记录的不断积累、对实际震害进行广泛调查、对结构破坏的积累效应分析,对结构的低周疲劳现象和非弹性破坏的研究深入等,而逐渐明确地震持续时间对结构破坏是一个重要因素。

近年来通过对某些地震震害实例以及同时记录到地震动加速度的过程,进行研究对比,了解到,有些地震动虽然十分强烈,但持续时间很短,建筑破坏较轻;有些地震动不十分强烈,但持续时间较长,对建筑物造成严重破坏。这些现象表明,只用地面运动的幅值和频谱特性还不足以反映地震对结构的破坏影响,只有同时考虑到地震动的持续时间的长短,才能说明建筑震害严重与否的原因。由此可见,强震持续时间对于结构破坏是一个重要因素,不容忽视。

另一个说明地震动持续时间重要性的依据是地震动造成的积累破坏效应。国内外的一些震害实例都可看到大地震的积累破坏效应。如1970年1月3日云南通海地震震级达7.7,建水县东山公社勒白大队在9度区,主震时房屋受到严重破坏,但许多房屋并未完全倒塌,而且有一村庄的房屋震害较轻,基本无倒塌。但在其后的一次余震时,该村的房屋几乎全部倒塌。这充分说明震级不大的余震,却会造成房屋倒塌的严重震害,这是积累破坏影响的结果。国外有人在总结美国、南斯拉夫、希腊、土耳其等国十余次强震震害经验时,反复强调指出这种积累破坏的影响。如果承认几次地震可以产生积累破坏,则强震持续时间加长,当然也可以造成同样的影响效果。

为了考虑持续时间的影响,必须给以明确的定义,然而至今尚无统一的意见。

现有的持续时间定义,大致如下:

1. 设有一地震动加速度过程 $a(t)$, 以某一幅值加速度 a_0 为标准, 绘出两条水平线 $a(t) = \pm a_0$, 则持续时间的定义为水平线 $a(t) = \pm a_0$ 的首次和末次与 $a(t)$ 相交的时间间隔。

$$T_d = T_2 - T_1 \quad (1-4)$$

由于 a_0 的取值不同, 所得的持续时间长短也不一样, 美国常用 $a_0 = 0.05g$ 或 $0.1g$, 因为更小的地震加速度不大会引起结构的破坏。

以加速度的绝对值来定义的, 称为 a_0 加速度持续时间; 以加速度相对值来定义的, 则称为分数持续时间, 一般采用 $a_0/a_{\max}$ 的比值, 常用的 $a_0/a_{\max} = \frac{1}{5} \sim \frac{1}{2}$ 。

2. 以地震动能量变化规律来表示强震持续时间。地震动能量是随时间而增长, 用

$\int_0^t a^2(t) dt$ 来表示, 其地震动能量随时间的相对变化规律, 则用总的能量去除, 即

$$I(t) = \frac{\int_0^t a^2(t) dt}{\int_0^T a^2(t) dt} \quad (1-5)$$

式中 T ——地震动总持续时间。

$I(t)$ 是一个从 0 到 1 的函数, 当 t 等于 T_1 和 T_2 时, 而使 $I(T_1)$ 和 $I(T_2)$ 定义如下: