

DIZHEN ZUOYONG XIA
HUNNINGTU DABA DONGLI XIANGYING JI YINGYONG

地震作用下 混凝土大坝动力响应及应用

强 跃 李 莉 陈思文 李文超 谭川蓉 著



東北大學出版社
Northeastern University Press

地震作用下混凝土大坝 动力响应及应用

强 跃 李 莉 陈思文 李文超 谭川蓉 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 强 跃 李 莉 陈思文 李文超 谭川蓉 2018

图书在版编目 (CIP) 数据

地震作用下混凝土大坝动力响应及应用 / 强跃等著

— 沈阳 : 东北大学出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-5517-1917-9

I. ①地… II. ①强… III. ①混凝土坝—大坝—地震
灾害—地震预防 IV. ①TV642

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 153209 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83683655(总编室) 83687331(营销部)

传真: 024-83687332(总编室) 83680180(营销部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 17

字 数: 382 千字

出版时间: 2018 年 6 月第 1 版

印刷时间: 2018 年 10 月第 1 次印刷

组稿编辑: 周文婷

责任编辑: 李 佳

责任校对: 杨 楠

封面设计: 潘正一

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1917-9

定 价: 58.00 元



前 言

地震作用下混凝土大坝动力响应是水利水电开发和工程建设中面临的一个亟待解决的问题,历来受到国内外学者的关注和重视,我国从“八五”期间就将这方面列为国家科技攻关课题。近年来,有关大坝动力分析、抗震工程学的研究在理论基础、试验方法和数值模拟等方面有了快速发展,广大科技工作者在科学研究和工程应用上也取得了诸多进步,特别是以有限元法为代表的数值模拟方法取得很大突破,已成为这方面广泛使用的手段和方法。本书是在重庆市 2011 协同创新中心“三峡水库生态环境保护与灾害防治”、重庆市教委科学技术研究项目“三峡库区地质环境监测与灾害预警”(CXTDX201601034)、重庆市教委科学技术研究项目青年项目“周期饱水下含砂土石混合体劣化机理研究”(KJQN201801224)、“强震作用下土石混合体宏细观力学特性研究”(KJ131107)、重庆市万州区科技人才专项“三峡库区村镇建筑防震减灾实用技术研究”(2017027)、重庆三峡学院重大培育项目“后三峡库区农田水利建设施工风险评价与控制系统研究”(15ZP04)、重庆三峡学院创新团队“三峡库区工程结构防灾减灾与安全”、重庆三峡学院成果转化项目“中小型农田水利建设施工风险评价及应用”(17Zh01)等资助下完成的,对混凝土大坝的动力响应及应用的研究现状进行了总结和论述,介绍了工程地震学基本理论,分析了基于有限元参数化动力响应的主要方法;结合实际工程,利用有限元参数化语言,分别研究了混凝土重力坝、高薄拱坝地震作用下建模方法、荷载作用、力学性能、位移变化和抗震措施,给出了具体工程改进手段等内容。

我国对水工大坝抗震研究由来已久,虽然取得了诸多成果,但仍有大量问题需要进一步研究,特别是针对动力响应分析和工程实践结合不均衡发展,这两方面长期存在一定问题,只有不断进行理论基础研究,借鉴相近学科的最新成果,才能与工程实践互相促进发展。本书的目的在于针对水工混凝土大坝地震作用动力响应方面,系统梳理大坝地震动力响应理论及有限元参数化方法,针对具体过程,给出相应的手段和步骤,结合典型工程,全方位地剖析水工大坝动力响应过程和性能。全书以动力响应研究为主线,穿插工程应用,有利于展示计算手段和方法,并附有相应的代码,以备查和参考。

本书第 4 章、第 6 章、第 8 章由强跃撰写,第 2 章、第 3 章由李莉撰写,第 1 章、



第5章由李文超、谭川蓉撰写，第7章由陈思文撰写，全书由强跃统一审定。在本书付梓之际，谨向本书所有参考文献的作者、支持或参与本课题研究的赵明阶、谭泽富、陈维林、程龙飞、何建等表示衷心的感谢！同时，对土木工程学院全体教师和书中提供工程实例的单位表示衷心的感谢！

本书可供水利水电、地震工程、爆破工程等领域的工程技术人员和相关专业的研究生参考使用。由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，希望读者见谅，并提出宝贵意见。

著者

2018年3月

目 录

第 1 章	地震基础	1
1.1	地球的构造及地震的成因	1
1.2	震源、震中和震级	5
1.3	地震的破坏作用	6
1.4	地震波、震级和烈度	11
第 2 章	地震动特性及随机模型	21
2.1	强地震动观测	21
2.2	地震动随机模型	25
2.3	地震动的工程特性及其影响因素	30
第 3 章	地震反应计算	37
3.1	地震反应计算的发展历程	37
3.2	单自由度体系的弹性地震反应分析	40
3.3	单自由度体系的水平地震作用与反应谱	46
3.4	多自由度弹性体系的地震反应分析	52
3.5	多自由度弹性体系的最大地震反应与水平地震作用	58
第 4 章	有限单元法基础理论	69
4.1	有限元法公式的建立	69
4.2	平面问题有限单元法	79
4.3	空间问题有限单元法	94
4.4	有限元静力分析中线性方程组的解法	104
4.5	有限元动力分析中平衡方程组的解法	114

第 5 章	ANSYS 及参数化语言设计	127
5.1	概述	127
5.2	ANSYS 计算基本流程	128
5.3	ANSYS 参数化设计语言	129
第 6 章	地震作用下碾压混凝土重力坝动力响应研究及应用	131
6.1	概述	131
6.2	动力响应理论的实现和应用	133
6.3	碾压混凝土重力坝振型分解反应谱法动力响应分析	147
6.4	碾压混凝土重力坝时程动力分析法动力响应分析	176
第 7 章	地震作用下高薄拱坝动力响应研究及应用	199
7.1	概述	199
7.2	高薄拱坝抗震计算理论及方法	202
7.3	基于 ANSYS 平台的高薄拱坝三维有限元静力分析	211
7.4	地震作用下高薄拱坝反应谱动力响应分析	225
7.5	地震作用下高薄拱坝时程动力响应分析	237
第 8 章	结语	255
参考文献		259



第1章 地震基础

地震是一种危及人民生命财产安全、破坏性极大的突发性自然灾害。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。据统计,地球上每年大约发生 500 万次地震,其中造成严重破坏的近 20 次、毁灭性的地震约 2 次。我国是一个地震多发的国家,历史上,在邢台、唐山、通海、昭通、甘孜、海城、台湾、海原、华县、丽江等地区都发生过比较严重的地震,尤其是 2008 年 5 月 12 日发生的汶川特大地震给人们留下了难以磨灭的记忆。

1.1 地球的构造及地震的成因

1.1.1 地球的构造

地球是一个椭圆球体,平均半径约 6400km,它主要由三层不同的物质构成(见图 1.1.1)。第一层为地壳,厚度不均,为 5~70km,主要由海水、风化土及多种岩层(如花岗岩和玄武岩)组成。绝大多数的地震均发生在这一层。地壳是地球的表面层,也是人类生存和从事各种生产活动的场所。地壳实际上是由多组断裂的、很多大小不等的块体组成的,它的外部呈现出高低起伏的形态,因而地壳的厚度并不均匀:大陆下的地壳平均厚度约 35km,我国青藏高原的地壳厚度达 65km 以上;海洋下的地壳厚度仅为 5~10km;整个地壳的平均厚度约 17km,这与地球平均半径 6371km 相比,仅是薄薄的一层。地壳上层为花岗岩层(岩浆岩),主要由硅-铝氧化物构成;下层为玄武岩层(岩浆岩),主要由硅-镁氧化物构成。理论上人们曾经认为地壳内的温度和压力随着深度增加,每深入 100m 温度升高 1℃。近年的钻探结果表明,在深达 3km 以上时,每深入 100m 温度升高 2.5℃,到 11km 深处温度已达 200℃。目前所知地壳岩石的年龄绝大多数小于 20 亿年,即使是最古老的石头——丹麦格陵兰的岩石——也有 39 亿年;而天文学家考证地球大约已有 46 亿年的历史,这说明地球壳层的岩石并非地球原始壳层,是以后由地球内部的物质通过火山活动和造山活动构成的。

第二层为地幔,厚度约 2865km,主要由橄榄岩组成,相对密度为 3.9~5.1,主要由致密的造岩物质构成,这是地球内部体积最大、质量最大的一层。地幔又可分成上地幔和下地幔两层。一般认为,上地幔顶部存在一个软流层,推测是由于放射元素大量集中、蜕变放热,将岩石熔融后造成的,可能是岩浆的发源地。软流层以上的地幔部分和地壳共同组成了岩石圈。下地幔温度、压力和密度均增大,物质呈可塑性固态。地球内部的



压力随着深度增加而增大，内部放射物质不断释放热量，地球内部的温度也随着深度的增加而升高。在地幔的上部(地下 700km 深处的温度已达到 2000°C)。地幔在高温高压作用下处于一种流塑状态。地幔内部物质在高温状态下和不均衡压力作用下产生缓慢的运动，即所谓地幔对流。地幔对流是地壳运动的主要根源。

第三层为地核，平均厚度约 3400km。地核还可分为外地核、过渡层和内地核三层：外地核厚度约 2080km，物质大致呈液态，可流动；过渡层的厚度约 140km；内地核是一个半径为 1250km 的球心，物质大概是固态的，主要由铁、镍等金属元素构成。地核的温度和压力都很高，估计温度在 5000°C 以上，压力达 1.32 千亿帕以上，密度为 $13\text{g}/\text{m}^3$ 。美国一些科学家用实验方法推算出地幔与核交界处的温度为 3500°C 以上，外核与内核交界处温度为 6300°C ，核心温度约 6600°C 。地球的平均密度为 $5515\text{kg}/\text{m}^3$ 。由于地表物质的平均密度只有约 $3000\text{kg}/\text{m}^3$ ，因此可以得知，地球核心区域有密度更大的物质。

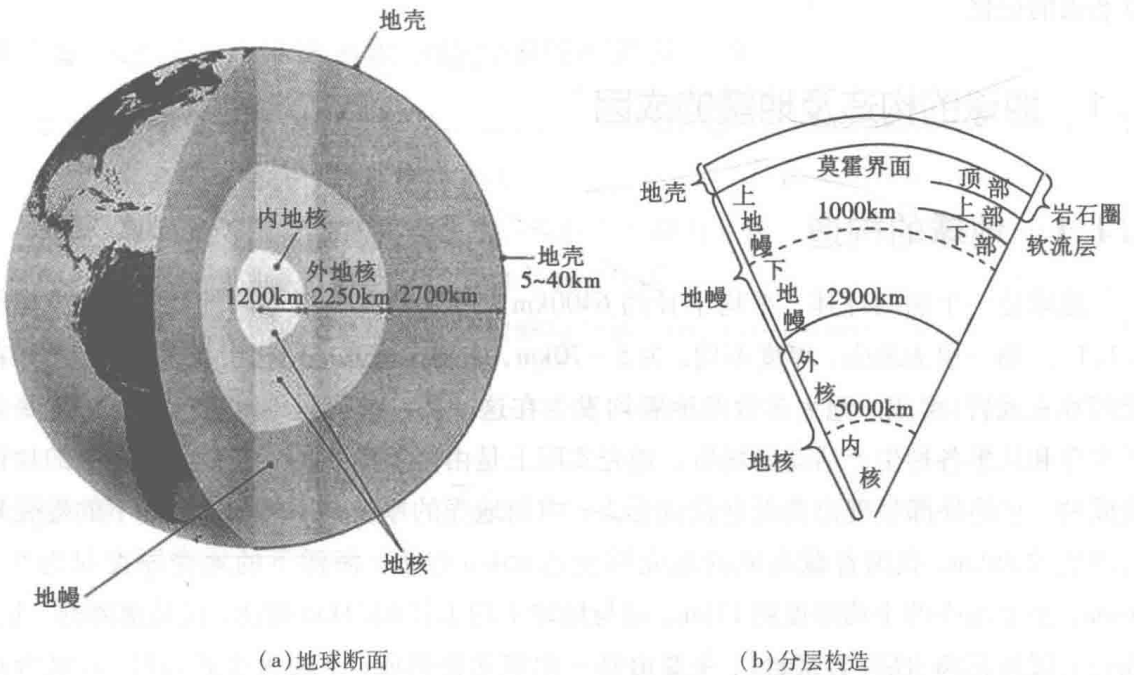


图 1.1.1 地球的构造

地球各部分的密度随着深度的增加而增大，平均密度约为 $55\text{kN}/\text{m}^3$ 。地壳密度为 $27 \sim 30\text{kN}/\text{m}^3$ ，地幔的外周部分密度为 $33\text{kN}/\text{m}^3$ ，内周部分为 $57\text{kN}/\text{m}^3$ ；地核的最外部分密度为 $97\text{kN}/\text{m}^3$ ，中心部分为 $123\text{kN}/\text{m}^3$ 。

地球内部的压力，一般认为：在地幔的外部为 900MPa ，地核外部为 14GPa ，其中心部为 37GPa ，这些压力比岩石在普通状态下的单轴抗压强度大得多。

(1) 地震的类型及成因

1.1.2.1 地震的成因

地震是地壳在内、外应力作用下，集聚的构造应力突然释放，产生震动弹性波，从震源向四周传播引起的地面颤动。地震又称地动、地振动，是地壳快速释放能量过程中造成的振动，期间会产生地震波的一种自然现象。

关于地震成因的研究已有近百年的历史,早期的地震成因说倾向于断层破裂学说。后期的观点则侧重于板块观点。这两种观点并不矛盾,主要是出发点不同,前者从局部机制,后者从宏观背景来论述震源机制。目前有如大陆漂移学说、海底扩张学说等。现在比较流行的是大家普遍认同的板块构造学说。1965年,加拿大著名地球物理学家威尔逊首先提出“板块”概念,1968年,法国人把全球岩石圈划分成六大板块,即欧亚、太平洋、美洲、印度洋、非洲和南极洲板块。板块与板块的交界处,是地壳活动比较活跃的地带,也是火山喷发、地震产生较为集中的地带。板块学说是大陆漂移、海底扩张等学说的综合与延伸,它虽不能解决地壳运动的所有问题,却为地震成因的理论研究奠定了基础。

从局部机制来论述地震成因的弹性回跳学说,是20世纪初由里德(Reid)提出的。他最初是根据1906年美国旧金山8.3级大地震前后横跨圣安德烈斯断层的一些测标位移实测数据而得出的结论。

里德的弹性回跳学说认为:①地壳由弹性的、有断层的岩层组成,地壳运动产生的能量以弹性应变能的形式在断层及其附近岩层中长期积累;②当弹性应变能积累及其岩层产生的变形达到一定程度时,断层上某一点的两侧岩体会发生相对位移错动,并使沿断层的邻近点随之发生位移,以致断层两侧岩体向相反方向突然滑动,地震因之产生,此时,断层上长期积累的弹性应变能突然释放;③地震后,过去在应变能作用下发生变形的岩体又重新恢复没有变形的状态。

地球内部和地壳的运动,使岩层受到巨大的挤压力而发生形变。当作用力只能使岩层产生弯曲而没有丧失其连续完整状态时,岩层只发生褶皱[图1.1.2(b)];当岩层脆弱部分的强度承受不了强大的作用力时,岩层便产生断裂和错动[图1.1.2(c)]。这种断裂和错动发生振动,传到地面,使地面振动,这就是地震。断层的许多连续的不规则的破裂的随机组合,通过复杂的地质构造,经过多次反射、折射和衰减而到达地面,这就是地震运动过程。在岩层受力产生变形过程中,积蓄了巨大的应变能,在岩层破裂时,应变能被释放出来。一次地震所释放出来的最大能量可达 $5 \times 10^{18} \text{J}$ 。

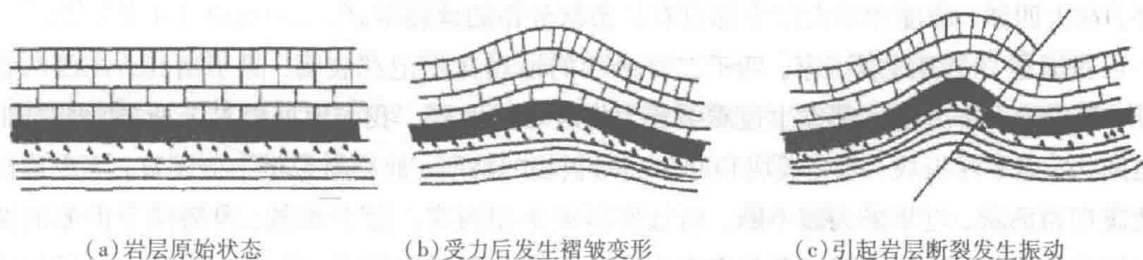


图 1.1.2 构造变动与地震形成示意图

20世纪60年代中期,根据岩石力学实验结果,改进了弹性回跳学说,使得解释局部震源机制的断层学说得到了完善。弹性回跳学说认为,断层发生错动时,把全部积累的应变能释放完,震后,震源基本处于无应力状态;而改进后的弹性回跳学说又称为黏滑学说,认为每一次断层发生错动时只释放了积累总能量中的一小部分,而剩余部分则为

断层面上很高的动摩擦力所平衡。地震后，断层两侧仍有摩擦力使之固结，并可以再积累应力而发生较大的地震，这一观点得到了地震序列类型的支持。

弹性回跳学说对地壳为何发生运动、弹性应变能怎样得以积累等宏观原因没有给予说明，而板块学说则说明了这一点。

关于地震的成因还有另一种说法——岩浆作用学说，认为在半凝固的地壳中，由于热与应力的平衡破坏，涌进部分地壳裂缝的岩浆，或者产生新的裂缝；更由于岩浆的状态发生变化，使地壳发生剧烈的变动。

还有一种学说是用地球自转来解释的。地球自转的速度总趋势是在变快，但在漫长的地质历史中，也有由快变慢的阶段。当转速发生变化时，就有惯性力的作用，使地壳发生东西向的移动。同时，当转速加快，赤道直径增大，两极距离逐渐缩短。反之，两极距离增大。这样，地壳就发生东西向或南北向的挤压或拉伸。地壳各块运动速度不同，还发生扭剪，这些变形产生的应力超过地层岩体的强度时，就发生断裂。

虽然地震活动带主要分布在中生代以后的造山运动生长的陆地，但有些古大陆如东部西伯利亚与加拿大的盾形地区也发生地震。因此，可以认为，地震的原因并不一定只有一种。

世界上有两条主要地震带：环太平洋地震带与欧亚地震带。环太平洋地震带基本上是太平洋沿岸大陆海岸线的连线，从南美洲的西海岸向北，到北美洲西海岸的北端，再向西穿过阿留申群岛，到俄罗斯的堪察加平岛折向下岛群岛，沿日本列岛，地震带在此分为两支：一支向西南经琉球群岛南下，经过我国台湾地区、菲律宾到印度尼西亚、苏拉威西岛；另一支向东至马里亚纳群岛、新几内亚，两支汇合后，经所罗门群岛、新赫布里底群岛、斐济群岛到汤加，突然转向新西兰。全世界 75% 左右的地震发生在这一地震带。欧亚地震带是东西走向的地震带，西端从大西洋上的亚速尔岛起，向东途经意大利、希腊、土耳其，伊朗、印度北部，至喜马拉雅山脉，进入我国西部与西南部边境，向南经过缅甸，呈弧形转向东至印度尼西亚，最后与环太平洋地震带的新几内亚相接。这一地震带是全球中、深源地震的多发地区。全世界 22% 左右的地震发生于这一地震带。另外，在大西洋、印度洋等大洋中部也有呈条状分布的地震带。

我国是一个多地震国家，四千二百余年的地震文献记载表明，除了浙江、江西两省外，我国绝大部分地区都发生过震级较大的破坏性地震。我国地处世界上两条大地震带之间，受太平洋板块、印度板块和菲律宾海板块的挤压，地震断裂带十分发育，不少地区地震相当活跃，近年来大震不断，而且发震频率相当高。除了西藏、台湾位于世界的两大地震带以外，强烈地震主要分布在南北地震带和东西地震带。南北地震带的北段位于宁夏贺兰山，经过六盘山甲经四川中部到云南东部，全长两千多公里。该地震带构造相当复杂，全国许多强震就发生在这条地震带上，如 1920 年宁夏海原 8.5 级地震、1739 年银川 8 级地震、1970 年通海 7.7 级地震、1973 年炉霍 7.9 级地震，1976 年松潘 7.2 级地震及 2008 年汶川地震，都位于这条地震带上。这条地震带的宽度比较大，少则几十千米，最宽处达到几百千米。

(2) 地震的类型

地震的类型包括火山地震、陷落地震、构造地震、诱发地震。在某些地壳薄弱点,发生火山喷射,岩浆猛烈冲出地面时引起的地面振动,即所谓火山地震。在地表或岩层内的溶洞塌陷或古矿坑塌陷及山坡崩塌等原因造成的地面振动,称为陷落地震。由于地壳运动产生的力,推挤地壳岩层,使其薄弱部位发生突然破裂错动引起的地震,称为构造地震。地球上发生的绝大多数地震都是构造地震。由于水库蓄水改变了水文地质条件和地层的应力状态,使古老断层复活而导致的地震称为诱发地震。

前两类地震多是局部性的,数虽不多,不到天然地震总数的10%,影响范围和破坏程度都较小。这两种地震一般震级也比较低,对人类不构成威胁。第四类地震是诱发断层活动而产生,实际也属于构造地震。构造地震的影响范围广,破坏程度大,发生也最频繁,是人类必须认真对待的。

根据震源深度(h)不同,地震可分为:浅源地震($h < 60 \sim 70\text{km}$),约占地震总数的72%;深源地震($h > 300\text{km}$),占地震总数的4%;中源地震($h = 70 \sim 300\text{km}$),约占地震总数的24%。目前观测到的最大震源深度为720km。

人们通常还把一次较大的地震称为主震,与之有关的发生在主震前的地震称为前震,发生在主震后的地震称为余震。前震、主震、余震就构成了一个完整的地震序列。根据地震记录,有三种基本类型:①主震余震型,主震释放能量最大,伴以相当数目的余震和不完整的前震。典型的有1976年的唐山大地震、1975年的海城大地震等。②震群型地震,主要能量通过多次较强地震释放,并伴以大量小震,如1966年的邢台地震、1988年的澜沧-耿马地震等。③单发型地震,主震突出,前震与余震很少,如1976年的内蒙古和林格尔地震。在这三种类型的地震中,主震余震型地震约占60%,震群型地震占30%,单发型地震仅占10%左右。

1.2 震源、震中和震级

地震发生的地点叫震源。震源、震中在理论上是“点”,震源正对着的地面,或者说震源在地表的投影叫“震中”,在实际中都代表一个“区”。震源至地面的垂直距离叫“震源深度”,以 h 表示(图1.2.1)。对于坝址或建筑物地址到震中的距离叫“震中距”,以 D 表示。对于远震或深源、中源地震也常用地心所张的角来表示 D ,见图1.2.1(b)。坝址或建筑物到震源的距离叫“震源距”,以 R 表示。坝址或建筑物到发震断层的垂直距离叫“断层距”,以 D_1 表示[图1.2.1(c)]。

世界上绝大多数地震是浅源地震,震源深度大多在20~70km。中源地震较少,深源地震则更少。我国吉林省东部延边地区是深源地震区。一般来说,对于同样震级的地震,当震源浅时,破坏程度大而波及范围小;相反,震源深时,破坏程度小而波及范围大。多数破坏性地震的震源浅,深度不超过50km。深度超过100km的地震,不致造成灾害。震级小而震源很浅时,也会造成大灾害,但波及范围不大。

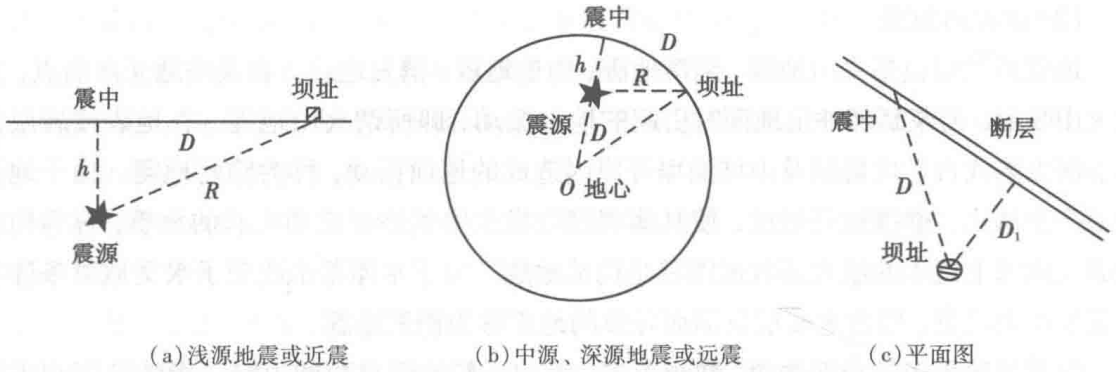


图 1.2.1 震源跟、震中距、断层距示意图

当坝址或建筑物离震中虽远而时，因受断层影响，其震害将较大离发震断层近。这时，坝址或建筑物的地面加速度应根据“断层距”计算。

1.3 地震的破坏作用

世界大地震不但造成了大量的人员伤亡，还使大量建筑遭到毁坏，交通、生产中断，水、火、疾病等次生灾害发生，给人类带来了不可估量的损失。一次大地震可令一座繁荣、美丽的城市在数十秒钟内变成一片废墟(图 1.3.1)。近百年世界主要大地震情况见表 1.3.1。



图 1.3.1 “5·12”汶川地震后的北川县城

我国处于两大地震带的中间，东临环太平洋地震带，西处地中海－喜马拉雅地震带，是世界上地震较多的国家之一。我国境内的地震分布也具有分区条带的特征，主要有东北深震带、台湾－闽粤沿海地震带、华北地震区、新疆地震带和川滇藏青地震区等，其中，华北地震区包括郯城－庐江带、燕山带、山西带、渭河平原带、银川带、六盘山带和河北平原带等。台湾省位于环太平洋地震带上，这些地区是我国地震最多、最强烈的地区。另外，河北、山东、山西、陕西、甘肃、宁夏等省也是地震活动比较强烈的地区。地震发生的地区在地貌上大多表现为盆地，如宁夏盆地(宁夏)、渭河盆地(陕西)、临汾盆地和太原盆地(山西)等。而贵州、广西、江苏、浙江、江西、湖南、湖北等省历史上记载的地震次数较少，也不强烈。在强烈地震发生时，地面受到地震波的冲击产生的强烈运

动、断层运动及地壳变形等，出现各种破坏现象。

表 1.3.1 近百年世界主要大地震情况表(7.5 级以上)

时 间	地 点	震 级	死亡人数(约数)
1906	美国洛杉矶	8.3	3000
1906	智利	8.6	20000
1908	意大利	7.5	38000
1915	意大利	7.5	30000
1920	中国甘肃	8.5	200000
1923	日本东京	8.3	142800
1927	中国	8.3	20000
1934	印度	8.4	11000
1935	印度	7.5	30000
1939	智利	8.3	28000
1939	土耳其	7.9	33000
1960	智利	8.9	5000
1964	日本新潟	7.5	5100
1970	秘鲁	7.7	66800
1976	中国唐山	7.6	240000
1976	危地马拉	7.5	22800
1976	菲律宾	7.8	8000
1978	伊朗	7.7	25000
1985	墨西哥	8.1	12000
1990	伊朗	7.7	75000
1990	土耳其	7.7	27000
1990 年 7 月	菲律宾吕宋	7.7	1621
1992 年 12 月	印度尼西亚	7.5	2500
1993 年 7 月	日本北海道	7.8	250
1995 年 5 月	俄罗斯库页岛	7.5	2700
1996 年 2 月	印度尼西亚	8.0	145
1999 年 9 月	中国台湾集集	7.8	2500
2001 年 1 月	印度	7.9	2000 余
2004 年 12 月	印度尼西亚苏门答腊 西北近海	9.0	292000
2005 年 3 月	印度尼西亚苏门答腊岛	8.5	不明
2008 年 5 月	中国汶川	8.0	68000
2011 年 3 月	日本东京	9.0	11232
2015 年 4 月	尼泊尔博克拉	8.1	8200 余

1.3.1 地表破坏现象

(1) 地面的断裂错动和地裂缝

强烈地震时,地下断层面直达地表,地貌随之改变。显著的垂直位移造成断崖峭壁;过大的水平位移产生地形、地物的错位;挤压、扭曲造成地面的波状起伏和水平错动。

由于这些断裂错位,使道路中断、铁路扭曲(图 1.3.2)、桥面断裂、房屋破坏,严重的可使河流改道、水坝受损(图 1.3.3),直接造成灾害。



图 1.3.2 地震中铁路扭曲



图 1.3.3 水坝局部垮塌

地裂缝是地震时最常见的现象,主要有两种类型。一种是强烈地震时由于地下断层错动延伸至地表而形成的裂缝,称为构造地裂缝。这种裂缝与地下断裂带的走向一致,其形成与断裂带的受力性质有关,一般规模较大,形状比较规则,通常呈带状出现(由数条地裂缝组成),裂缝带长度可达几千米甚至几万米,裂缝带宽度可达几米甚至几十米。另一种地裂缝是在古河道、湖河岸边、陡坡等土质松软地方产生的地表交错裂缝,其大小形状不一,规模也较前一种小。地裂缝穿过道路、结构时通常会使它们遭受破坏(图 1.3.4)。



图 1.3.4 丽江地震中柏油路面震裂

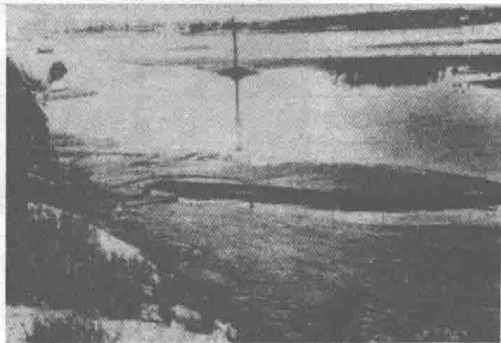


图 1.3.5 唐山地震中地面喷砂冒水

(2) 地面下沉(震陷)

地震造成的局部地面下陷的事件是多种多样的(图 1.3.6)。在石灰岩分布地区,地下溶洞十分发育,在矿区由于人类的生产活动也会存在空洞,大地震时都可能被震塌,地面的土石层也随之下沉,造成大面积陷落;在喷砂冒水严重的地方,也使地下出现洞穴。造成土地下沉,形成洼地。土地陷落的地方,当湖、海、河或地下水流入时,即可成灾。唐山地震时,天津市郊一处村庄沉陷 2.6m,池水流入,水深可行船。



图 1.3.6 日本神户地震中操场地面沉陷结



图 1.3.7 丽江地震时山体滑坡

(3) 河岸、陡坡滑坡

在河岸、陡坡等处,强烈的地震作用往往造成土体失稳,从而形成塌方河滑坡。有时会造成破坏道路、掩埋村庄、堵河成湖、房屋倒塌等严重震害(图 1.3.7)。

1.3.2 建筑物的典型破坏

在强烈地震作用下,各类建筑物发生严重破坏,按照其破坏的形态及直接原因,可分如下几类。

(1) 结构构件强度不足造成的破坏

任何承重构件都有各自的特定功能,以适用于承受一定的外力作用。对于设计时没有考虑抗震设防或抗震设防不足的结构,在强烈地震作用下,不仅构件内力增大很多,而且其受力性质往往也将改变,致使构件强度不足而被破坏。

(2) 结构丧失整体性而造成的破坏

房屋建筑都是由许多构件组成的,在强烈地震作用下,构件连接不牢、支撑长度不够和支撑失效等都会使结构丧失整体性而遭到破坏(图 1.3.8、图 1.3.9)。

(3) 地基失效

当建筑物地基内含饱和砂层、粉土层时,在强烈地面运动影响下,土中孔隙水压力急剧增高,致使地基土发生液化,地基承载力下降,甚至完全丧失,从而导致上部结构破坏(图 1.3.10)。



图 1.3.8 汶川地震中房屋倒塌



图 1.3.9 日本地震中房屋整体倒塌

1.3.3 设施的破坏

地震还会造成公路、铁路、桥梁、水坝、构筑物、地下结构、码头及河岸堤防等设施的破坏(图 1.3.11 ~ 图 1.3.13)。



图 1.3.10 地基失效北川中学五层教学楼仅剩三层

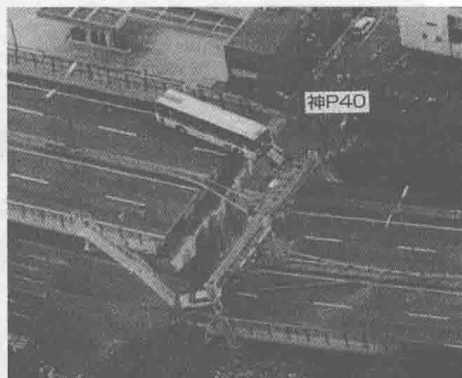


图 1.3.11 高速路面震断



图 1.3.12 桥面坠毁



图 1.3.13 地下柱破坏导致路面下陷

城市街道和交通公路震害特征基本相同,常见的破坏现象有:路基路面开裂、断裂、隆起或凹陷、道路喷水冒砂、道路两旁滑坡或堆积物阻塞或冲毁路面等。

铁路分为地面铁路和地下铁路两部分。震后,由于轨道、路基、桥梁等工程遭到不同程度的破坏,同时,因房屋倒塌砸坏通信、电力、供水、机务等辅助设施和设备,常常使铁路瘫痪。轨道震害表现在平面和纵断面的严重变形上,呈“蛇曲”或“波浪形”。路基震害主要是下沉、开裂、边坡塌落和塌陷等。地下铁路破坏一般较轻微,相对安全。如 1995 年墨西哥大地震中,地表破坏十分严重,而地下铁路路基基本完好。1989 年美国洛马普里埃塔 7.1 级地震,担负着旧金山和奥克兰之间的重要交通运输任务的地铁并没有遭到破坏,只是由于地震后电力暂时中断和震害检查而无法立刻使用。

构筑物(如烟囪、水塔等)、地下结构、码头及河岸堤防等会在地震中受到不同程度的破坏。在中等烈度下,烟囪震害主要集中发生在中、上部,且破坏的部位随烈度的增加而下移;水塔主要由水柜、支撑结构及基础组成,震害主要发生在支撑上,很少有水柜和基础发生破坏的震害实例;地下结构,尤其是浅埋的地下结构震害的主要形式包括地