

国家精品课程土木工程抗震与防灾丛书

# 地震、风、火灾害调查与简析

DIZHEN FENG HUO ZAIHAI DIAOCHA YU JIANXI

叶继红 主编

张志强 王 浩 潘金龙 编

国家精品课程土木工程抗震与防灾丛书

# 地震、风、火灾害调查与简析

叶继红 主编

张志强 王 浩 潘金龙 编

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

地震、风、火灾害调查与简析/叶继红主编. —北京:  
中国建筑工业出版社, 2016. 5

(国家精品课程土木工程抗震与防灾丛书)

ISBN 978-7-112-19418-6

I. ①地… II. ①叶… III. ①土木工程-防震设计  
②土木工程-防灾-结构设计 IV. ①TU352.04

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第094789号

本书系统介绍了典型地震、风、火三种灾害下土木工程结构的破坏实例,并运用专业知识进行系统归纳与深入浅出的分析。

本书可作为土木工程高校防灾减灾课程教材,也可供结构工程师学习参考。

责任编辑:刘瑞霞 刘婷婷

责任校对:李美娜 李欣慰

国家精品课程土木工程抗震与防灾丛书

地震、风、火灾害调查与简析

叶继红 主编

张志强 王浩 潘金龙 编

\*

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

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京市安泰印刷厂印刷

\*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:11 字数:266千字

2016年9月第一版 2016年9月第一次印刷

定价:32.00元

ISBN 978-7-112-19418-6

(28664)

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

东南大学开设的“工程结构抗震与防灾”课程于 2007 年获得国家精品课程称号，2013 年入选教育部国家精品资源共享建设课程。课程组教师均为土木工程防灾减灾一线科研人员。通过课程团队多年教学的经验积累和科研底蕴，形成了理论与实践、原理与经验、科学研究与工程实用相结合的教学方法与手段。“工程结构抗震与防灾”课程涉及地震、风灾和火灾。课程性质和内容直接关乎国家安全、社会稳定和经济发展；对学生的工程素养和工程能力的培养意义重大；而且在帮助学生建立社会责任感、历史使命感方面具有不可替代的作用。

本教材是围绕“工程结构抗震与防灾”课程主教材而编写的系列辅助教材之一。本科生对建筑或桥梁结构在地震、风、火下的灾害了解甚少，而课堂学时有限，讲授的知识主要以基本理论和设计计算方法为基础，学生消化、吸收难度较大。本教材采用深入浅出的语言，对著名的地震、风、火造成的建筑或桥梁、隧道灾害进行介绍，增强学生的感性认识，也增强学生的社会责任感；进而，结合主教材知识，对典型案例进行破坏机理分析，有助于学生对本门课程知识点的理解、掌握。本教材也可作为结构工程师的参考用书。

叶继红

2016.03.16

# 目 录

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 第 1 章 地震活动和启示 .....                        | 1  |
| 1.1 世界地震活动 .....                           | 1  |
| 1.2 中国地震活动 .....                           | 2  |
| 1.3 历次地震结构破坏的特点 .....                      | 3  |
| 1.3.1 1957 年墨西哥地震 (Mexico) .....           | 3  |
| 1.3.2 1960 年智利康塞普西翁阿劳科半岛地震 (Chile) .....   | 4  |
| 1.3.3 1963 年南斯拉夫斯科普里市地震 (Skopje) .....     | 4  |
| 1.3.4 1964 年日本新潟地震 (Niigata) .....         | 5  |
| 1.3.5 1964 年美国阿拉斯加地震 (Alaska) .....        | 6  |
| 1.3.6 1967 年委内瑞拉加拉加斯地震 (Caracas) .....     | 7  |
| 1.3.7 1968 年日本十胜冲地震 (Tokatsu Oki) .....    | 8  |
| 1.3.8 1970 年秘鲁地震 (Peru) .....              | 9  |
| 1.3.9 1971 年美国圣费尔南多地震 (San Fernando) ..... | 10 |
| 1.3.10 1972 年尼加拉瓜马那瓜地震 (Managua) .....     | 10 |
| 1.3.11 1976 年中国唐山地震 .....                  | 12 |
| 1.3.12 1978 年日本宫成冲地震 .....                 | 13 |
| 1.3.13 1978 年希腊萨洛尼卡地震 .....                | 13 |
| 1.3.14 1985 年墨西哥地震 .....                   | 14 |
| 1.3.15 1988 年亚美尼亚地震 .....                  | 14 |
| 1.3.16 1989 年洛马普里埃塔地震 .....                | 16 |
| 1.3.17 1994 年美国北岭地震 (Northridge) .....     | 16 |
| 1.3.18 1995 年日本阪神地震 (Kobe) .....           | 17 |
| 1.3.19 1999 年土耳其地震 .....                   | 18 |
| 1.3.20 1999 年台湾集集地震 .....                  | 20 |
| 1.3.21 2008 年中国汶川地震 .....                  | 21 |
| 1.3.22 2010 年智利地震 .....                    | 23 |
| 1.3.23 2010 年青海玉树地震 .....                  | 25 |
| 1.3.24 2010 年新西兰地震 .....                   | 27 |
| 1.3.25 2011 年东日本大地震 .....                  | 27 |
| 1.3.26 2013 年四川雅安芦山地震 .....                | 29 |
| 1.3.27 2013 年甘肃岷县地震 .....                  | 30 |
| 1.3.28 2014 年云南鲁甸地震 .....                  | 32 |
| 1.4 房屋建筑地震震害经验与启示 .....                    | 32 |
| 参考文献 .....                                 | 34 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第2章 场地原因引起的震害          | 35 |
| 2.1 断裂带                | 35 |
| 2.1.1 断裂带定义            | 35 |
| 2.1.2 断裂带的产生原因         | 35 |
| 2.1.3 断裂带引起的震害         | 36 |
| 2.1.4 设计对策             | 37 |
| 2.2 山体滑坡               | 39 |
| 2.2.1 山体滑坡定义           | 39 |
| 2.2.2 山体滑坡的原因          | 39 |
| 2.2.3 震害               | 40 |
| 2.2.4 山体滑坡的防治措施        | 40 |
| 2.3 局部地形               | 42 |
| 2.3.1 局部地形定义           | 42 |
| 2.3.2 原因               | 42 |
| 2.3.3 抗震措施             | 43 |
| 2.4 泥石流                | 44 |
| 2.4.1 地震在泥石流形成中的作用     | 44 |
| 2.4.2 震害               | 45 |
| 2.4.3 抵抗措施             | 46 |
| 2.5 液化                 | 47 |
| 2.5.1 液化的定义及其原因        | 47 |
| 2.5.2 主要震害特点           | 47 |
| 2.5.3 防治措施             | 51 |
| 2.6 结构与场地共振            | 51 |
| 2.6.1 结构与场地共振          | 51 |
| 2.6.2 1985年墨西哥地震概况分析   | 52 |
| 2.6.3 结构与场地共振防治对策      | 54 |
| 参考文献                   | 55 |
| 第3章 建筑体型原因引起的震害        | 56 |
| 3.1 建筑的不规则性            | 56 |
| 3.1.1 建筑结构的规则性         | 56 |
| 3.1.2 建筑不规则性引起的震害      | 57 |
| 3.1.3 建筑物形体的抗震设计对策     | 62 |
| 3.2 防震缝不合理设置           | 64 |
| 3.2.1 防震缝              | 65 |
| 3.2.2 防震缝作用            | 65 |
| 3.2.3 防震缝设置原则          | 65 |
| 3.2.4 防震缝不合理设置引起的震害    | 66 |
| 3.2.5 防震缝宽不满足要求时应采取的措施 | 68 |

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 参考文献 .....                     | 69        |
| <b>第 4 章 结构布置原因引起的震害 .....</b> | <b>70</b> |
| 4.1 结构扭转效应 .....               | 70        |
| 4.1.1 结构扭转效应的定义 .....          | 70        |
| 4.1.2 结构扭转效应的成因 .....          | 70        |
| 4.1.3 结构扭转引起的震害 .....          | 71        |
| 4.2 结构薄弱层 .....                | 75        |
| 4.2.1 薄弱层定义 .....              | 75        |
| 4.2.2 结构产生薄弱层的原因 .....         | 75        |
| 4.2.3 震害特点 .....               | 76        |
| 4.2.4 薄弱层的抗震设计对策 .....         | 77        |
| 4.3 混合结构体系 .....               | 77        |
| 4.3.1 混合结构定义 .....             | 77        |
| 4.3.2 混合结构体系震害案例及原因与措施 .....   | 78        |
| 4.3.3 混合结构体系防震措施 .....         | 80        |
| 参考文献 .....                     | 82        |
| <b>第 5 章 不同结构体系的震害 .....</b>   | <b>83</b> |
| 5.1 框架结构 .....                 | 83        |
| 5.1.1 框架结构的定义 .....            | 83        |
| 5.1.2 框架结构的特点 .....            | 83        |
| 5.1.3 框架结构的震害 .....            | 84        |
| 5.1.4 框架结构抗震设计 .....           | 89        |
| 5.2 剪力墙结构 .....                | 90        |
| 5.2.1 剪力墙结构的定义 .....           | 90        |
| 5.2.2 剪力墙的分类 .....             | 90        |
| 5.2.3 剪力墙结构的震害 .....           | 91        |
| 5.2.4 混凝土剪力墙结构的抗震设计对策 .....    | 93        |
| 5.3 框架-剪力墙结构 .....             | 94        |
| 5.3.1 框架-剪力墙结构的定义 .....        | 94        |
| 5.3.2 框架-剪力墙结构的共同工作特性 .....    | 94        |
| 5.3.3 框架-剪力墙结构的震害 .....        | 95        |
| 5.3.4 框架-剪力墙结构设计原则 .....       | 95        |
| 5.4 砖混结构 .....                 | 95        |
| 5.4.1 砖混结构的定义 .....            | 95        |
| 5.4.2 砖混结构体系震害案例及原因 .....      | 95        |
| 5.4.3 砖混结构体系抗震措施 .....         | 101       |
| 5.5 钢结构 .....                  | 105       |
| 5.5.1 钢结构的震害 .....             | 105       |
| 5.5.2 钢结构的基本抗震措施 .....         | 107       |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 参考文献 .....                    | 111 |
| <b>第 6 章 非结构构件的震害</b> .....   | 112 |
| 6.1 填充墙 .....                 | 112 |
| 6.1.1 填充墙的震害特点 .....          | 112 |
| 6.1.2 填充墙的震害分析 .....          | 114 |
| 6.1.3 填充墙的基本抗震措施 .....        | 114 |
| 6.2 雨篷 .....                  | 115 |
| 6.2.1 雨篷的震害 .....             | 116 |
| 6.2.2 减轻雨篷震害的措施 .....         | 116 |
| 6.3 阳台 .....                  | 116 |
| 6.3.1 阳台的结构布置 .....           | 117 |
| 6.3.2 阳台的震害 .....             | 117 |
| 6.3.3 抗震措施 .....              | 117 |
| 6.4 女儿墙 .....                 | 118 |
| 6.4.1 女儿墙的震害 .....            | 118 |
| 6.4.2 减轻女儿墙震害的措施 .....        | 119 |
| 6.5 幕墙 .....                  | 120 |
| 6.5.1 幕墙的震害与分析 .....          | 120 |
| 6.5.2 幕墙的基本抗震措施 .....         | 123 |
| 参考文献 .....                    | 123 |
| <b>第 7 章 结构风灾破坏实例</b> .....   | 125 |
| 7.1 房屋建筑结构 .....              | 126 |
| 7.2 高耸结构 .....                | 128 |
| 7.3 大跨空间结构 .....              | 129 |
| 7.4 桥梁结构 .....                | 130 |
| 7.5 发电站冷却塔结构 .....            | 132 |
| 7.6 输电塔结构系统 .....             | 132 |
| 7.7 广告牌结构 .....               | 133 |
| 7.8 港口设施 .....                | 134 |
| 7.9 海上石油钻井平台 .....            | 135 |
| 7.10 风力发电系统 .....             | 136 |
| 参考文献 .....                    | 136 |
| <b>第 8 章 结构风灾典型案例简析</b> ..... | 139 |
| 8.1 村镇低矮房屋 .....              | 139 |
| 8.2 玻璃幕墙结构 .....              | 140 |
| 8.3 高压输电塔结构 .....             | 141 |
| 8.4 宁波市北仑体艺中心 .....           | 142 |



|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 8.5 旧塔科马大桥 .....               | 144        |
| 8.6 英国渡桥热电厂冷却塔 .....           | 145        |
| 8.7 大型广告牌结构 .....              | 146        |
| 8.8 海上风力发电系统 .....             | 148        |
| 参考文献 .....                     | 150        |
| <b>第9章 结构火灾典型案例介绍与简析 .....</b> | <b>153</b> |
| 9.1 911 纽约世贸大楼 .....           | 153        |
| 9.1.1 911 火灾事故概况 .....         | 153        |
| 9.1.2 世贸大厦结构概述 .....           | 154        |
| 9.1.3 世贸大厦倒塌破坏原因分析 .....       | 154        |
| 9.2 央视新址大楼 .....               | 156        |
| 9.2.1 火灾事故概况 .....             | 156        |
| 9.2.2 火灾事故原因分析 .....           | 158        |
| 9.3 济南奥体中心 .....               | 158        |
| 9.3.1 场馆与火灾事故概述 .....          | 158        |
| 9.3.2 “东荷”火灾事故总结 .....         | 159        |
| 9.4 上海市某教师公寓 .....             | 160        |
| 9.4.1 火灾事故概况 .....             | 160        |
| 9.4.2 火灾事故原因分析 .....           | 160        |
| 9.5 长春市某单层厂房结构 .....           | 162        |
| 9.5.1 火灾事故概况 .....             | 162        |
| 9.5.2 火灾事故原因分析 .....           | 164        |
| 9.6 美国加利福尼亚州某桥梁结构 .....        | 164        |
| 9.7 圣哥达隧道 .....                | 165        |
| 9.7.1 隧道概况 .....               | 165        |
| 9.7.2 隧道火灾事故概述 .....           | 165        |
| 9.7.3 火灾事故分析和反思 .....          | 166        |
| 参考文献 .....                     | 166        |

# 第 1 章 地震活动和启示

地震是一种常见的自然现象，也是地壳运动的一种表现。由于地球不断运动和变化，逐渐积累了巨大的能量在地壳某些脆弱地带，造成岩石突然破裂，或者引起原有断层产生错动，这就是地震。绝大部分地震发生在地壳中。

地震是群灾之首，它具有突发性和不可预测性、频度较高并产生严重次生灾害等特点。破坏性地震会给国家经济建设和人民生命财产安全造成直接和间接的危害和损失，尤其是强烈地震会给人类带来巨大的灾难。目前，每年全世界由地震灾害造成的平均死亡人数达 8000~10000 人/次，平均经济损失每次达几十亿美元。据联合国统计，21 世纪以来，全世界因地震死亡人数达 260 万，占全球自然灾害所造成的死亡总和的 58%。

## 1.1 世界地震活动

全球每年发生地震约 500 万次，其中能感觉到的有 5 万多次，能造成破坏性的 5 级以上的地震约 1000 次；7 级以上强震平均每年 18 次；8 级以上大震每年发生 1~2 次。

根据全球构造板块学说，地壳被一些构造活动带分割为彼此相对运动的板块，板块当中有的块大，有的块小。大的板块有六个，它们是：太平洋板块、亚欧板块、非洲板块、美洲板块、印度洋板块和南极板块。全球大部分地震发生在大板块的边界上，一部分发生在板块内部的活动断裂上。经科学家研究，全球主要地震活动带有两个（见图 1.1）：

**环太平洋地震带** 地震主要集中在太平洋周围巨大的太平洋板块与周围的大陆板块碰撞交接处。这里分布着大部分浅源大地震和中深源地震以及几乎全部深源地震。地震分布从太平洋最北部的阿留申群岛向东西两个方向伸展：西经堪察加、千岛群岛到日本，向南绕菲律宾海板块分成东西二支——西支经琉球群岛、台湾、菲律宾和苏拉威西，东支经小笠原群岛、马利亚纳到澳大利亚以北的新几内亚岛、新赫布里底，而后再经新西兰与南太平洋相接；由阿留申群岛向东经阿拉斯加、加利福尼亚、墨西哥、加勒比海以东，再向南经秘鲁到智利。环太平洋带上浅源大地震的能量释放约占全球总释放能量的 75%，中深源和深源地震约占 90%，其中尤以日本、堪察加和南美的智利一带为最强。这里不仅集中着大量浅源地震，中深源和深源地震也很活跃。这两个地区释放的地震能量分别占全带地震能量的 20% 以上。整个环太平洋带上，中深源地震比较普遍，而深源地震只分布在新西兰、新赫布里底、新几内亚岛、巽他群岛、苏拉威西和棉兰、菲律宾一带，日本海到中国的吉林省也有深源地震分布。全球最深的地震深达 700 千米左右，只在萨摩亚群岛、巽他群岛、苏拉威西和棉兰记录到。

**地中海-喜马拉雅地震带** 又称欧亚地震带。这条地震带西起大西洋中的亚速尔群岛，东到印度尼西亚。这里分布着除环太平洋带以外的大部分浅源地震和其余全部的中深源地

震。浅源地震释放的能量约占全球浅源地震总能量的 20%左右，中深源地震能量占 11%。自有近代地震仪器记录以来，这里仅观测到一次 5 级的深源地震，即 1954 年 3 月 29 日发生在西班牙南部，震源深度在 600km 以上。这一地震带上的中深源地震在某些地区分布比较集中，如缅甸弧、兴都库什、罗马尼亚的弗朗恰、爱琴海、意大利的西西里岛北部等地区；浅源地震分布在一个相当宽的地带内，常常在两个碰撞带的南北两侧，在宽达 1000 多千米范围内均有地震频繁发生，这和环太平洋带上的地震分布在一个狭窄地带上有显著差别。在整个欧亚地震带内，地震活动最强的地方为帕米尔和阿萨姆地区，这里的地震不仅频度高，且强度大。1897 年和 1950 年分别在印度阿萨姆和中国察隅、墨脱一带发生 8.6 级世界罕见的特大地震。

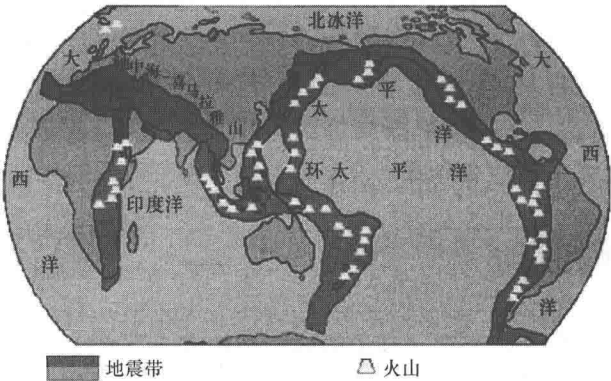


图 1.1 世界地震带分布

表 1.1 给出了 1900 年以来全球 7 级以上地震年均频率和 2008 年至目前的频率统计，可以看出目前全球地震活动出现一个明显增强的态势，特别是 8.5 级以上地震频发，说明地球有可能要进入地震活动活跃时代。

1900 年以来全球 7 级以上地震年均频率和 2008 年至目前的频率统计 表 1.1

| 震级档  | 1900 年以来<br>年均频次 | 2008 年 | 2009 年 | 2010 年 | 2011 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 |
|------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ≥7.0 | 19.3±6.2         | 19     | 20     | 28     | 20     | 4      | 14     | 9      |
| ≥8.0 | 1.05 ± 1.15      | 1      | 1      | 1      | 1      | 2      | 2      | 2      |

1.2 中国地震活动

我国位于环太平洋地震带和欧亚地震带这两大世界地震带之间，受太平洋板块、印度洋板块和菲律宾海板块的挤压，地震断裂带十分发育。

中国地震活动频度高、强度大、震源浅、分布广，是一个震灾严重的国家。在 20 世纪里，全球共发生 3 次 8.6 级以上的强烈地震，其中两次发生在中国。全球发生两次导致 20 万人死亡的强烈地震也都发生在中国，一次是 1920 年宁夏海原地震，造成 23 万多人死亡；一次是 1976 年河北唐山地震，造成 24 万多人死亡。这两次地震死亡人数之多，在

全世界也是绝无仅有的。

20 世纪以来，中国共发生 6 级以上地震近 800 次，遍布除贵州、浙江两省和香港、澳门特别行政区以外所有的省、自治区、直辖市。最新的《中国地震动参数区划图》全国抗震设防烈度 7 度及 7 度以上地区面积占 58%，8 度及以上地区面积占 18%。

1900 年以来，中国死于地震的人数达 60 万之多，占全球地震死亡人数的 53%。1949 年以来，100 多次破坏性地震袭击了 22 个省（自治区、直辖市），其中涉及东部地区 14 个省份，造成 27 万余人丧生，占全国各类灾害死亡人数的 54%，地震成灾面积达 30 多万平方公里，房屋倒塌达 700 万间。地震及其他自然灾害的严重性构成中国的基本国情之一。

我国地震活动主要分布在五个地区的 23 条地震带上（见图 1.2）。这五个地区是：①台湾省及其附近海域；②西南地区，主要是西藏、四川西部和云南中西部；③西北地区，主要在甘肃河西走廊、青海、宁夏、天山南北麓；④华北地区，主要在太行山两侧、汾渭河谷、阴山-燕山一带、山东中部和渤海湾；⑤东南沿海的广东、福建等地。

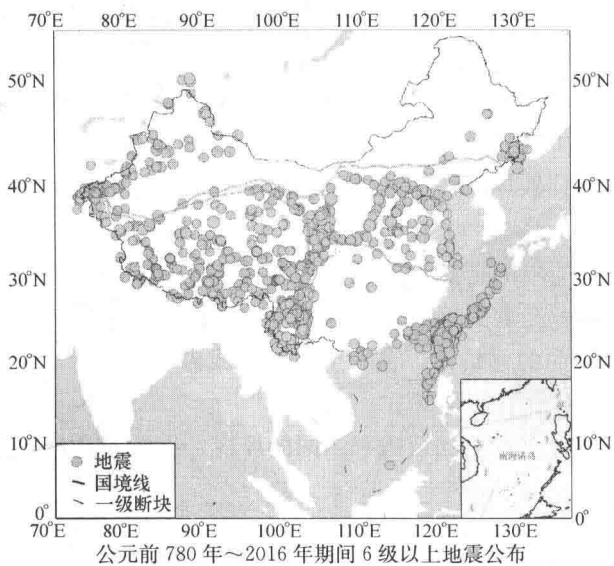


图 1.2 中国地震震中分布

### 1.3 历次地震结构破坏的特点

本节将简要介绍若干有代表性的大地震中房屋建筑的震害情况和经验教训，以便从中吸取正反两方面经验，改进我们的设计与施工。

#### 1.3.1 1957 年墨西哥地震 (Mexico)

地震发生于 1957 年 10 月 28 日，在墨西哥城的南部，7.6 级，震中烈度 8 度。市内为湖相沉积和厚度达 1km 以上的冲积层（黏土与砂互层），地基卓越周期在 2.5s 左右，最大加速度估计是  $0.05g \sim 0.1g$ 。分山区、过渡区和湖泊区三个地带。地震时三个区的影响程度不同，其中高山区破坏较轻，湖泊区破坏严重，甚至有的建筑物发生倒塌。

地震时,该市 55 座 8 层以上的建筑中,11 座钢筋混凝土框架遭到破坏。其特点是 5 层以上的建筑震害比较大,未与骨架紧密联系的填充墙、隔墙有明显裂缝。钢筋混凝土框架裂缝与相邻建筑物的碰撞有很大关系。按现代抗震设计建造的高层建筑震害比较小,这有力地证实了建筑物抗震设计的重要性。

在基础构造方面,作为打到坚硬地基上的钢筋混凝土桩,顶部有拉梁连接时几乎没有破坏,而其他木桩基础和混凝土基础等的建筑物破坏较严重。

### 1.3.2 1960 年智利康塞普西翁阿劳科半岛地震 (Chile)

1960 年 5 月 21 日到 22 日智利发生了连续 225 次大地震。它的特点是地震多而震级高,其中十次超过八级,主震最高达到 8.9 级,震中烈度达到 11 度,是世界上最大的一次地震。地震引起了巨大海啸和火山爆发、地面下沉、河道阻塞。从南到北 600km 范围内,成为一片废墟,震害十分严重。影响面也极广,海啸一直到达日本东海岸,美国加州、甚至北极也有影响。

这次地震进一步说明在松散、软弱、含水的人工填土和冲积层、位于陡坡附近、基底面不规则或斜坡大、排水不良的地带,受到地震波的破坏最为严重。

调查表明智利 1940 年制定的抗震规范是有效的。如康塞普西翁城,1939 年发生过一次大震以后建造的考虑了抗震设计的建筑,即使在烈度高达 11 度震中区,也没有全部破坏。有的建筑之所以遭到破坏,往往是由于违反了建筑设计规范的原因。

这次地震的经验教训是:

(1) 钢筋混凝土剪力墙的抗震性能经受了考验,说明只要精心设计和施工,就能有效抵抗地震力。另一个问题是剪力墙在软土地基上,可能发生基础转动,进而导致破坏。

(2) L 形和 T 形平面的建筑物,会发生扭转造成破坏。

(3) 局部应力集中,会导致破坏。

(4) 不同类型的场地土对上部结构有不同的反应,因此对高层建筑应充分考虑下部土的卓越周期问题。

### 1.3.3 1963 年南斯拉夫斯科普里市地震 (Skopje)

地震发生在 1963 年 7 月 26 日清晨,震级 6 级,震中烈度 8~9 度,震源深度 5~10km,震中区范围 30km<sup>2</sup>。

这次地震震级虽不高,但破坏却较重。地震是冲击性的,持续时间极短,但最大加速度达 0.3g。据说有三次振动,两次水平,一次垂直。在强烈震动之后,连续发生多次余震。

1950 年后,斯科普里市作为马其顿共和国的行政中心和工业中心,需求量很大的公寓住宅快速建设,主要集中在城市的西边。超过 3000 套公寓在 3~5 年内建成,大多数为 5 层的石砌结构,施工质量很低。这些建筑的绝大多数在 1963 年斯科普里市地震中破坏严重,如图 1.3 和图 1.4 所示。图 1.5 为城市中心显著的震害情况,图 1.6 为旧城中表现良好的木结构。

此次地震证明,四层以下砖结构破坏重,高层建筑破坏较轻。纯框架结构,当底层砌有作为围护结构的实心砖墙时震害较轻;底层完全敞开的震害较重,框架柱上下两端发生

转动，造成混凝土压碎和柱子的永久性倾斜。框架-剪力墙结构普遍破坏较轻，只是在剪力墙中由于配筋不足、施工质量不佳和材料强度不够而出现了裂缝。

该地震表明：设计底层为柔性房屋时必须采取慎重措施，以保证整个房屋的安全，否则造成的倾斜或破坏将是很难修复的；其次是要注意设置足够宽度的防震缝，以避免相邻建筑的互相碰撞。



图 1.3 建筑物的典型震害



图 1.4 5层石砌建筑的右侧倒塌



图 1.5 市中心烟草工厂破坏严重



图 1.6 左侧木结构轻微损坏，右侧石砌结构完全倒塌

1.3.4 1964 年日本新潟地震 (Niigata)

1964 年 6 月 16 日新潟地震，7.4 级，震动持续了 2.5min。震中烈度 8 度，震源深度 60km。市内 1530 幢钢筋混凝土结构楼房有 310 幢遭到破坏，其中 44% 是上部结构有损坏；地基失效引起建筑的破坏为数甚多，一幢四层公寓整体倾斜，一幢四层清水商店下沉 1.5m，倾斜 19°。地震后 28min 内又发生三次海啸，冲击了流经新潟城的信浓川，淹没了市中心的大部分地区，造成了巨大破坏。图 1.7 所示昭和大桥在地震中倒塌。据目击者称，昭和大桥在地震发生 70s 后开始倒塌。通过研究表明，昭和公路大桥桥墩上部土层液



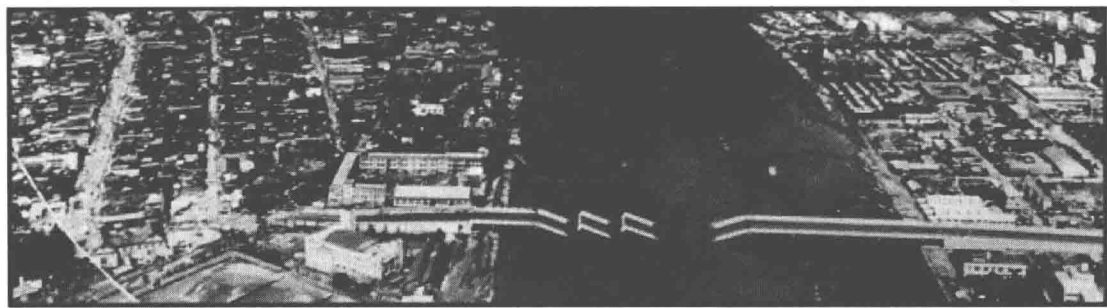


图 1.7 昭和大桥地震中倒塌

化，左岸滑动，墩柱移位，中央桁架被强力推动而坠落，使长为 306.4m 的 12 跨钢桁架简支桥有 5 跨坠入河中，中间两座桥墩卷入坠落的桁架之下而折曲，其中一座桥墩顶部最大残余变形 93cm。昭和大桥震害被认为是日本重视桥梁抗震的一个转折点。



图 1.8 地基液化导致楼房倾斜倒塌

这次震害证明：刚性较大的建筑物本身的破坏极轻。相反，柔性房屋却由于地面变形产生不均匀沉陷而使主体结构遭到破坏。

新潟地震的另一个重要经验是：在类似新潟这样的饱和砂土软土地区，多层建筑物的基础必须采用桩基、管柱和沉箱之类的措施，以防止上部结构的倾覆或建筑物的显著沉陷（图 1.8）。

### 1.3.5 1964 年美国阿拉斯加地震 (Alaska)

1964 年 3 月 27 日，当地时间下午 5 点 36 分，美国阿拉斯加州发生 8.5 级地震，震源深度在 25~40km 之间，震中距安克雷奇约 150km，破坏面积 13 万  $\text{km}^2$ ，有感面积 130 万  $\text{km}^2$ 。剧烈振动时间持续了 1.5~4min。地震后引起地表大规模变形，发生山崩、雪崩、滑坡、海啸，并使大片地面滑动、陷落。

地震时地表变形规模很大（见图 1.9），在安克雷奇以东有一块岩层长 640km 裂为两



图 1.9 地表变形

半, 远在夏威夷的地壳都发生了永久变形。在震中 320km 半径范围内的沿海区有许多裂缝。地震造成的海浪传到南极, 地震造成了地下水位变动, 影响到欧洲、非洲和菲律宾。

地震时建筑物遭到破坏, 但这种破坏不是由于震动而是由于地崩造成的。震中区安克雷奇地震时形成 4 个地崩断层。一般来说, 位于地崩断层附近的建筑破坏不可避免。但由于安克雷奇是新建城市, 大部分建筑物设计时都考虑了抗震要求, 因此地震时建筑物尽管发生不同程度的损坏, 却很少有倒塌现象, 因而伤亡较少。

归纳起来这次地震有以下经验教训:

(1) 剪力墙结构抗震性能良好。但具有带开口的多层剪力墙中(如竖向有一系列的门或过道), 墙和梁的连接是很关键的。这类并联剪力墙的连接如何使之起到整体作用, 应引起重视。

(2) 剪力墙在平面布置上要十分注意, 剪力墙布置上的偏心将导致建筑物的扭转破坏(图 1.10)。震害调查还表明, 许多双向配筋墙体未产生任何裂缝。

(3) 许多框架结构虽未受破坏, 但次要结构如填充墙等则产生严重裂缝, 甚至塌落。

(4) 地震侧向力按承受侧力构件的刚度分配, 因此, 刚性较大而强度较低的构件, 将首先导致破坏, 如楼梯间等。

(5) 装配式钢筋混凝土结构的破坏, 多发生在垂直和水平的连接节点上。节点的强度不够或冲击韧性差是造成破坏的主要原因(图 1.11)。



图 1.10 五层钢筋混凝土结构的 Penney 公司大楼, 因剪力墙布置偏心产生扭转破坏, 外墙板坠落, 部分梁柱折断, 楼层倒塌



图 1.11 六层预应力升板结构, 由两个楼梯井筒承担地震水平力。地震时井筒折断, 并向一侧倒塌, 楼板重叠在一起坍塌

(6) 在滑坡地区上的建筑不一定完全破坏, 而位于滑坡和稳定土体边界上的建筑物则遭到严重破坏, 但这是无法防御的, 因此应当避开这样的地区。

(7) 施工质量的低劣是造成震害的一个重要因素。混凝土施工缝处由于两次浇筑之间缺乏连续性而导致破坏; 对施工质量缺乏认真检查也是引起破坏的一个原因。

#### 1.3.6 1967 年委内瑞拉加拉加斯地震 (Caracas)

1967 年 7 月 29 日在加拉加斯西北 60km 的地方发生地震, 震级 6.3 级, 震中烈度 8 度, 震源在加勒比海里。地震时估计地面加速度东部是  $0.06 \sim 0.08g$ 。据调查结果, 不同土层的破坏率与沉积层厚度(到基岩)有关。当冲积层的厚度大于 160m 时, 14 层以上的建筑物破坏显著加重, 而基岩或薄的冲积层上的高层建筑几乎未遭破坏。



这次地震的特征是低频率、低衰减。震动周期约1s时加速度最大值超过0.3g。卓越周期长的地基对层数多的房屋和低柔性底层房屋地震影响不利，因为这类房屋的基本周期与地基周期相近似。

土质条件对地震震害大小有明显影响。加拉加斯平原软弱的冲积层土上建造的高层房屋就受到了很大的破坏。可是，在同样条件下，与高层房屋相邻的低层房屋却安然无恙，十分完好，尽管这些私人的低层房屋通常未考虑过抗震要求。

一些经受了1967年委内瑞拉地震的8~17层房屋，很好地表现出了柔性底层房屋在地震后的性能。所有房屋的高层部分没有出现重大破坏，但柔性层柱的上下节点区受到破坏严重。这些节点区的混凝土部分碎裂，柱内钢筋鼓出。这是由于应力大量集中和在往复振动过程中柱结构产生剩余变形造成的。

一栋16层结构底层框架角柱在地震时受到破坏。显然，这种破坏的特点是与房屋水平扭转变形分不开的。柔性底层的角柱在这种情况下承受到了很大的附加荷载。振动时房屋底层发生扭转是由于在平面上房屋质量分布不均匀所致。

这次地震取得的经验教训是丰富的，主要归纳有以下几方面：

(1) 非结构构件以及非抗侧力构件，对结构预期的抗震性能影响较大。

(2) 倾覆力矩的影响在这次地震中表现得比较显著，超过了以往的总结、研究和观测的任何预言。如Macato sheraton Hotel破坏最重的就是内柱，其受力最大，主要原因是上部剪力墙弯曲产生的直接压力。

(3) 在混凝土构件的所有侧面上配置纵向钢筋证明是有效的。

(4) 框架中刚度突变区是一个危险区域，往往由于这个薄弱区域的存在，导致能量和应力集中的结果，而引起建筑物的破坏。

(5) 许多结构的破坏说明在地震区对混凝土柱构件的要求，应当比非地震区建筑物更为严格。连接处的强度应与被连接构件相同，甚至更强。

(6) 与抗震墙相连的楼板受力很大，在连接节点处应予以特殊考虑。

(7) 相邻建筑物碰撞问题应引起适当的重视，否则亦会造成震害。

(8) 其他如扭转作用、屋顶水箱的设计问题以及使楼梯在地震后仍能保持使用等问题。

(9) 要考虑基础和地基的影响。

### 1.3.7 1968年日本十胜冲地震 (Tokatsu Oki)

1968年5月16日，日本十胜冲发生地震，震级8级。这次地震震害与新潟地震类似，主要突出表现在土壤地基方面，影响遍及日本北海道南端以及本州北部广大地区。这次地震的主震延续时间长达80s左右，水平地面运动峰值加速度约在0.18g~0.28g。

这次地震使位于太平洋北岸的一些城市按照抗震规范设计的三、四层钢筋混凝土公共建筑物遭受严重破坏，主要是柱X形剪切裂缝和主筋弯曲、混凝土破碎等，反映出设计方法上的严重缺陷，造成公众很大的不满，形成很大压力。日本在关东大地震后，对于6层及以下公共建筑多采用钢筋混凝土结构，7层以上则用劲性钢筋混凝土结构。经过十胜冲地震并联系国外一些地震，认识到主要是构造不可靠，如箍筋太细太稀、绑扎不牢等；