

RIBEN KANGZHEN JIEGOU JI
GEZHEN JIEGOU DE
SHEJI FANGFA

日本抗震结构及隔震结构的设计方法

傅金华 著

中国建筑工程工业出版社

日本抗震结构及隔震结构的设计方法

傅金华 著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

日本抗震结构及隔震结构的设计方法/傅金华著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2010. 8

ISBN 978-7-112-12167-0

I. ①日… II. ①傅… III. ①抗震结构—结构设计—研究—日本 IV. ①TU352

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 105406 号

本书内容限于钢筋混凝土结构或预应力混凝土结构。本书共分七章。第一章主要回顾了我国及日本近代发生的、影响较大的几次地震及这些地震给人们生命财产及建筑结构带来的损害。第二章介绍了日本抗震结构设计及隔震结构设计的发展历史, 以及制定各种设计规范的历史背景。在这章中, 还介绍了一些具有代表性的抗震结构及隔震结构。在第三章中, 对正在日本施行的新抗震设计法的具体设计步骤作了详细说明, 同时, 给出了新抗震设计法的具体设计例。在第四章中, 结合设计例, 介绍了日本 2002 年开始施行的极限强度设计法。第五章主要涉及高层结构的设计方法。在这章中, 还介绍了与建筑设计有关的法律及规定。第六章介绍了日本隔震结构使用的各种隔震支座及减震器的弹塑性性能。第七章介绍了隔震结构的设计方法及设计例。

本书可作为国内相关设计人员及工程技术人员参考之用。

* * *

责任编辑 常 燕

日本抗震结构及隔震结构的设计方法

傅金华 著

*

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

广州恒伟电脑制作有限公司制版

北京京丰印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 20 $\frac{1}{2}$ 字数: 508 千字

2011 年 12 月第一版 2011 年 12 月第一次印刷

定价: 42.00 元

ISBN 978-7-112-12167-0

(19444)

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

建筑结构的抗震设计是一门经验科学,是从无数地震灾害的经验教训中逐渐总结出来的。日本是世界上地震发生最为频繁的国家,也是世界上第一个制定抗震设计规范的国家。抗震设计规范制定的契机是1891年发生的浓尾地震。自此次地震开始,在一个世纪以上的时间内,每当大地震发生时,建筑结构都会遭受不同形式的破坏,抗震设计规范也随之不断修改、完善。但抗震设计规范无论如何修改、完善,经抗震设计而建成的抗震结构由于依靠结构本身材料的强度、变形来吸收地震能量,地震时结构遭受一定程度的破坏是不可避免的。为弥补抗震结构的这一缺点,自20世纪80年代开始,另一种结构形式——隔震结构在日本逐渐发展起来了。本书结合具体设计案例,主要介绍现在日本正在使用的建筑结构的抗震设计法及隔震设计法。

本书内容限于钢筋混凝土结构或预应力混凝土结构。本书共分七章。第一章主要回顾了我国及日本近代发生的、影响较大的几次地震及这些地震给人们生命财产及建筑结构带来的损害。第二章介绍了日本抗震结构设计、隔震结构设计的发展历史,以及制定各种设计规范的历史背景。在这章中,还介绍了一些具有代表性的抗震结构及隔震结构。在第三章中,对正在日本施行的新抗震设计法的具体设计步骤作了详细说明,同时,给出了新抗震设计法的具体设计案例。在第四章中,结合设计案例,介绍了日本2002年开始施行的极限强度设计法。第五章主要涉及高层结构的设计方法。在这章中,还介绍了与建筑结构设计有关的法律及规定。第六章介绍了日本隔震结构使用的各种隔震支座及减震器的弹塑性性能。第七章介绍了隔震结构的设计方法及设计案例。

作者1988年留学于日本东北大学工学研究科建筑构造学研究室。在结构动力学、结构地震反应分析等方面得到了柴田明德教授的指导。在五年的留学生活中,无论在研究方面,还是在个人生活得到了柴田教授的热心指导和极大的帮助,这是作者永远不能忘怀的,作者在此表示衷心的感谢。

作者从1994年开始工作于日本的P.S.三菱株式会社,作者将感谢对本书的编写予以协力的P.S.三菱株式会社的有关人员。

在本书的出版过程中,中国建筑工业出版社的常燕女士给予了很大的支持与帮助,作者在此表示由衷的感谢。

在日本的工作过程中,作者主持、参与设计了各种不同类型的建筑结构。作者衷心希望能够通过本书把这些结构的设计方法、设计经验传授给国内的设计人员及工程技术人员,从而避免或减轻地震对人民生命财产带来的损失。

由于作者长期居住海外,对于一些国内的专业词汇可能有使用不当之处。由于时间限制、作者水平有限,缺点错误在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

第1章 我国及日本的地震灾害	1
1.1 我国的地震灾害	1
1.2 日本的地震灾害	6
第2章 抗震结构及隔震结构的设计历史	19
2.1 抗震结构的设计历史	19
2.2 隔震结构的设计历史	25
第3章 新抗震设计法	43
3.1 新抗震设计法简介	43
3.2 第一步设计	46
3.3 第二步设计	56
3.4 结构地下部分的设计	80
3.5 设计例	80
第4章 极限强度设计法	110
4.1 极限强度设计法的概要	110
4.2 等效线性法与极限强度设计法的关系	110
4.3 设计加速度反应谱	116
4.4 表层地基的增大系数	119
4.5 基础的水平及回转变形对周期的影响	124
4.6 设计地震力	126
4.7 损伤极限强度设计的具体步骤	130
4.8 安全极限强度设计的具体步骤	134
4.9 设计例	138
第5章 高层结构的设计	155
5.1 建筑确认申请	155
5.2 适合性判定	155
5.3 性能评审	156
5.4 高层结构的设计	158
5.5 设计例	176
第6章 隔震支座与减震器	198
6.1 隔震器材的种类及性能	198
6.2 隔震支座	199
6.3 隔震支座与减震器的复合装置	210
6.4 减震器	222

第7章 隔震结构的设计	238
7.1 隔震结构的设计方法概要	238
7.2 小规模隔震结构的各种规定	240
7.3 高度60m以上隔震结构的设计	241
7.4 高度60m以下隔震结构的设计	251
7.5 设计例	263
附录1 各种螺纹钢筋的面积及周长	301
附录2 钢筋及混凝土的容许应力	302
附录3 混凝土的弹性模量	303
附录4 各种构件的容许强度	304
附录5 各种构件的极限强度	311
附录6 刚度低下率	316
附录7 各种结构的随机荷载	317
附录8 抗风设计	318
附录9 楼板对梁的有效宽度	320
附录10 表层地基的增大系数	321
参考文献	326

第1章 我国及日本的地震灾害

1.1 我国的地震灾害

地球活动的重要标志之一就是地震。人类生活在地球表面，地面上的所有人造建筑物在地震发生时都不可避免地要遭受地震的冲击。有些大地震可能会给人类带来灾难性后果。

我国是一个多地震国家，世界上遭受地震损害最大的国家就是我国，几次给人类带来灾难性后果的地震就发生在我国。在本节中，将介绍一些我国近期发生的几次破坏性较大地震。

(1) 邢台地震

1966年3月8日，在河北省邢台地区的隆尧县东，发生了强烈地震，震级6.8级，震源深度为10km，震中烈度为9度强。3月22日，在同一地区的宁晋县东南又发生了两次地震，其震级分别为6.7及7.2。包括上述3次地震，从3月8日到3月29日，邢台地区一共发生了5次震级为6级以上的地震，这些地震统称为邢台地震。

邢台地震的破坏范围较广，造成了8064人死亡，38451人受伤，倒坏房屋508万栋。同时，这次地震还造成了公路、桥梁的破坏。图1-1为邢台地震中倒塌的房屋。震后，很多地方连续发生了火灾，烧毁了大片山林，烧伤了很多人员。



图1-1 邢台地震中倒塌的房屋

(2) 海城地震

海城地震留给人们记忆最深的就是这次地震的预报成功，而且是世界上惟一一次准

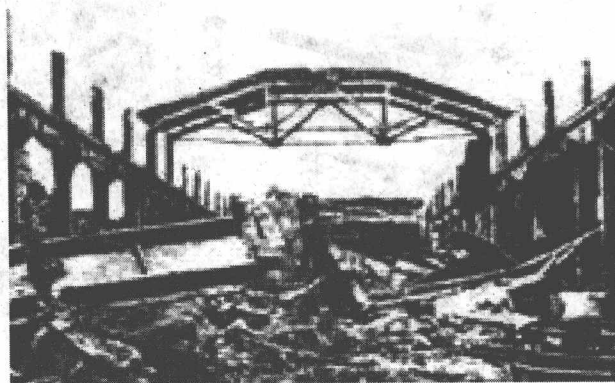
确、成功的地震预报。1975年2月4日，在辽宁省海城、营口一带发生强烈地震，震级为7.3，震源深度在16~21km，震中烈度为9度强。极震区面积为760km²，震域几乎覆盖整个辽宁省南部。

早在1973年初，辽宁省内发现了很多地震前兆现象，国家地震局加强了在辽宁省的地震观测。1975年2月4日，终于在地震发生的6h之前，发出了地震预报，当地政府及时采取了有力的防震措施。这次地震是该地区有史以来最大的地震，属于内陆型直下地震，破坏力较大。除房屋建筑和其他工程结构遭到不同程度的破坏之外，地震时因大多数人都撤出了房屋，所以人员损失极少。在这次地震中，伤亡人员总数为29579人，其中死亡2041人。地震造成城镇房屋倒塌及破坏约500万m²，公共设施损坏165万m²，农村房屋毁坏1740万m²，城乡交通、水利设施破坏2937个。各种设备、物资也遭到严重损失，总计约8.1亿元。地面喷沙孔大的直径达2.5m。有一地震断裂，长约5.5km，裂缝带宽处达40m。营口市破坏面积占全市总面积的53.1%。

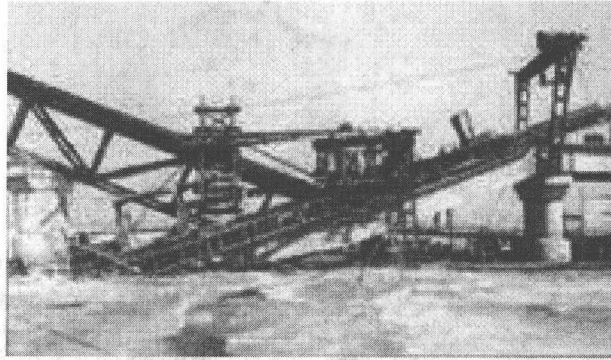
图1-2(a)为震后的海城招待所，图1-2(b)为震后的营口工厂厂房，图1-2(c)为崩落后的盘锦大桥。



(a)



(b)



(c)

图 1-2 海城地震

(a) 震后的海城招待所；(b) 震后的营口工厂厂房；(c) 崩落后的盘锦大桥

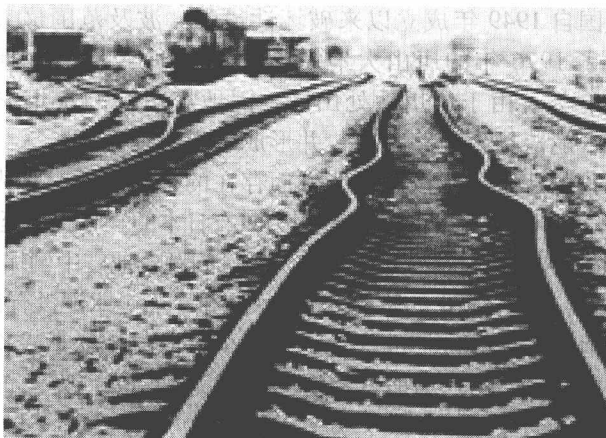
(3) 唐山地震

唐山市距北京东约 150km 左右，是我国北方重要的新兴工业城市，全市人口超过百万。1976 年 7 月 28 日凌晨，唐山市发生强烈地震。这次地震的震级为 7.8 级，震中烈度达 11 度，震源深度较浅，为 12km。

唐山地震震惊了世界，这次地震是 20 世纪带给人类损害程度最大的一次特大地震。这次地震造成 24.2 万人死亡，16.4 万人重伤，70 万人以上轻伤。死亡人数之多是历次地震少有的。

唐山地震是一次突发地震，震前的前兆现象并不明显，因此地震部门没有能够像海城地震那样作出震前预报。另外，唐山市的市街地带人口密集，而地震又发生在凌晨，正是人们沉睡的时间，许多人毫无防备，来不及逃难，因此在人员方面的损失是巨大的。

由于唐山市处于平原地区，在历史上并不是地震多发地带，所以唐山市建筑结构的抗震并没有受到重视，市内大多是毫无抗震性能的砖石结构，即使是钢筋混凝土结构，其抗震等级也很低。在地震发生的一瞬间，整个唐山市在几乎被夷为平地。图 1-3 (a) 为因地震而扭曲的铁轨，图 1-3 (b) 为震后的开滦医院，图 1-3 (c) 为崩落的桥梁。



(a)



(b)



(c)

图 1-3 唐山地震

(a) 扭曲的铁轨；(b) 震后的开滦医院；(c) 崩落的桥梁

(4) 汶川地震

2008 年 5 月 12 日，在四川省西北部的汶川县发生强烈地震。这次地震的震级为 8.0 级，震中为汶川县映秀镇，其烈度达 11 度，震源深度为 10 ~ 20km。

汶川地震是新中国自 1949 年成立以来破坏性最强、波及范围最大的一次地震，地震的强度、烈度都超过了 1976 年的唐山大地震。截至 2009 年 5 月，遇难 69225 人，受伤 374640 人，失踪 17939 人。由于汶川地处山区，因地震引起的次生灾害、地质灾害比较严重。土沙滑坡、山石崩落导致道路阻塞，并形成了很多堰塞湖。

汶川地震暴露了我国建筑结构抗震性能方面存在的很多问题。首先是设计地震力的大小是否合理。同样规模的结构，我国的设计地震力只有日本的一半，甚至更小，而汶川地震的能量则远远超过了日本阪神大地震。另外就是施工质量问题。地震中倒塌结构中梁、柱的配筋过少，根本达不到抗震要求。混凝土的质量也不过关，砂、石、水泥没有很好地配合。

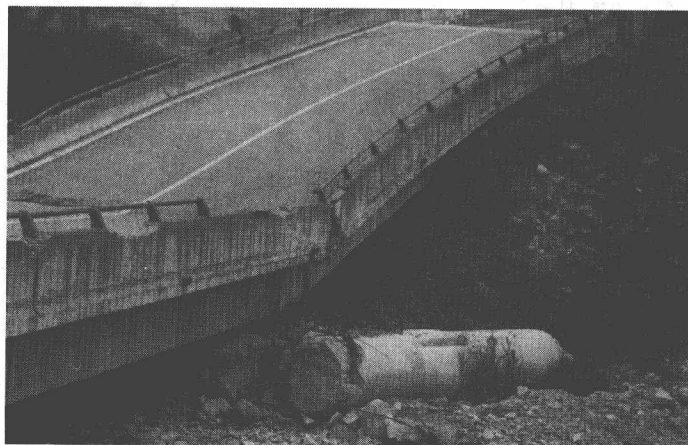
图 1-4 (a) 为地震中遭受破坏的柱，主筋过少，混凝土松散；图 1-4 (b) 中，结构的整个 2 层消失；图 1-4 (c) 为崩落的桥梁；图 1-4 (d) 为土石滑坡后的道路。



(a)



(b)



(c)



(d)

图 1-4 汶川地震

(a) 地震中遭受破坏的柱；(b) 整个 2 层因遭到破坏而消失；(c) 崩落的桥梁；(d) 土石滑坡堵塞道路

1.2 日本的地震灾害

如图 1-5 所示，日本是一个多地震国家，整个日本列岛分布在环太平洋地震带上。几乎每月都有不同程度的、有体感的中小型地震在日本各地发生。图 1-6 为发生在日本周边震级 4 以上的地震分布。

自古以来，日本关于地震灾害的纪录很多，下面将介绍近代及现代发生的、对日本的地震研究有影响的几次大地震^[1.1]。

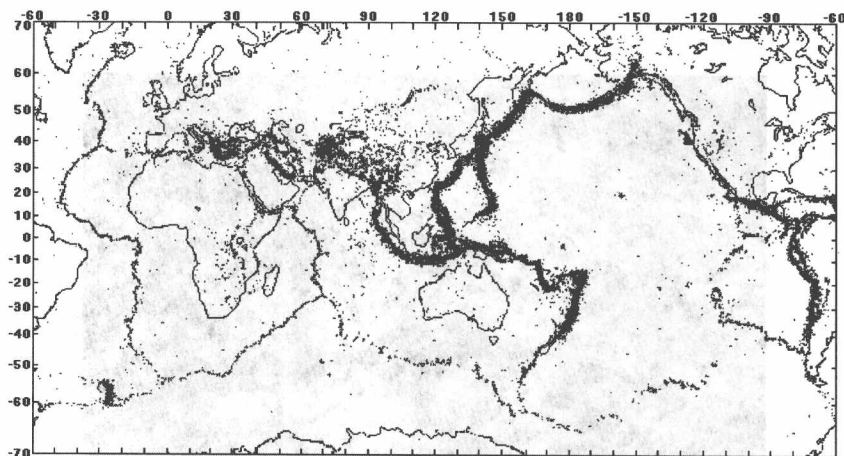


图 1-5 世界的地震分布图

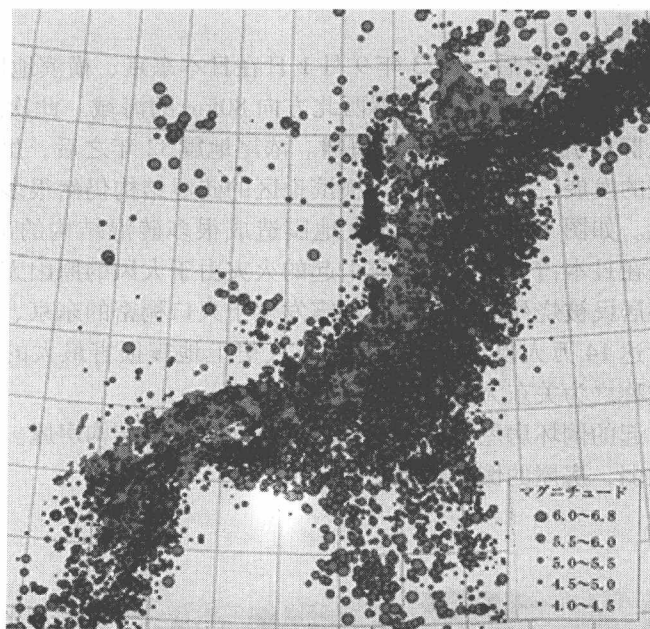


图 1-6 日本周边地震分布图

(1) 浓尾地震

日本的抗震结构研究起始于约 120 年前发生的浓尾地震。在浓尾地震之前，主要凭世代积累的经验建造房屋，而没有进行任何抗震结构设计。1891 年，在日本中部的岐阜县一带发生了震级 $M = 8.0$ 的地震。这次地震被称之为浓尾地震 (Noubi earthquake)，是当时日本国内最大的内陆型地震，也是日本近代史上影响最大的一次地震。这次地震的震源为根尾川断层，震后长达 80km 的断层出现在地表面。在断层附近，水平方向的错动达 2m，竖直方向的错动达 6m。如图 1-7 所示，这次地震，对当时没有经过任何抗震设计的房屋建筑产生了极大的破坏。这次地震的死者达 7273 人，被毁房屋达 14 万栋以上。

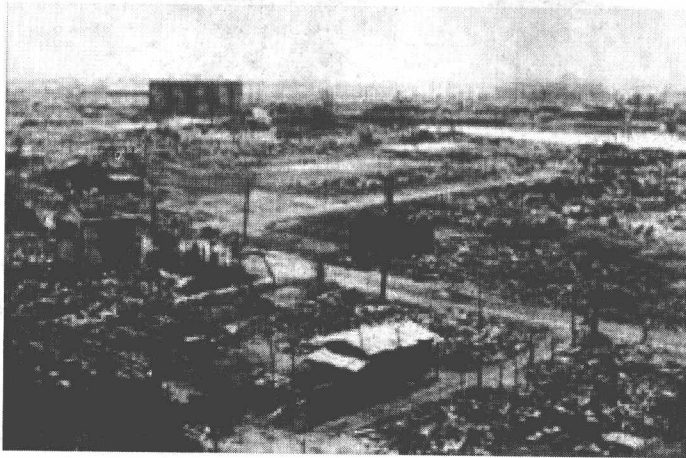


图 1-7 浓尾地震

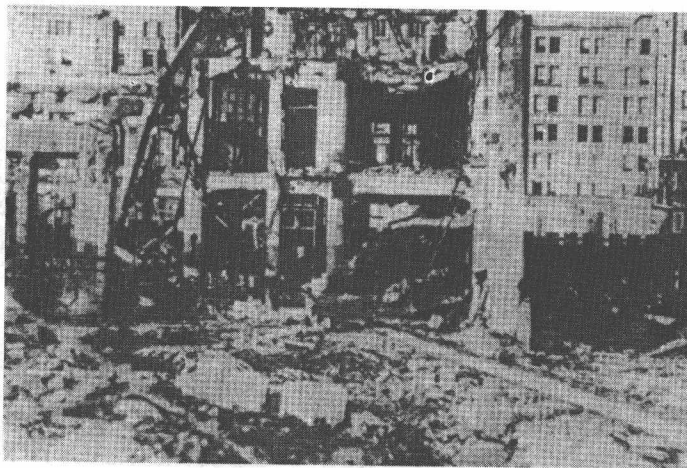
(2) 关东大地震

继 1891 年的浓尾地震之后, 1923 年 9 月 1 日在日本东京、横滨地区发生了震级 $M = 7.8$ 的大地震。这次地震的震源为相模湾西北方向 80km 的海域。此次地震在日本列岛的太平洋沿岸、伊豆群岛引起了 9~12m 的海啸。浓尾地震 32 年之后, 虽然关于建筑结构的抗震研究有了一定的发展, 但当时东京、横滨地区的砖混结构仍然很多, 这些结构几乎不具有任何抗震性能。如图 1-8 所示, 这次地震造成很多砖混结构的破坏、倒塌。另外, 由于木结构的民房在日本占大多数, 地震引起的火灾由于大风的原因无法得到控制, 很多房屋被烧失, 很多居民被烧死。由于这次地震发生于人口稠密的东京、横滨地区, 地震造成的死者、失踪者达 14 万人以上。这是日本近代史上地震损害最大的一次。由于损失巨大, 这次地震也被称之为关东大震灾。

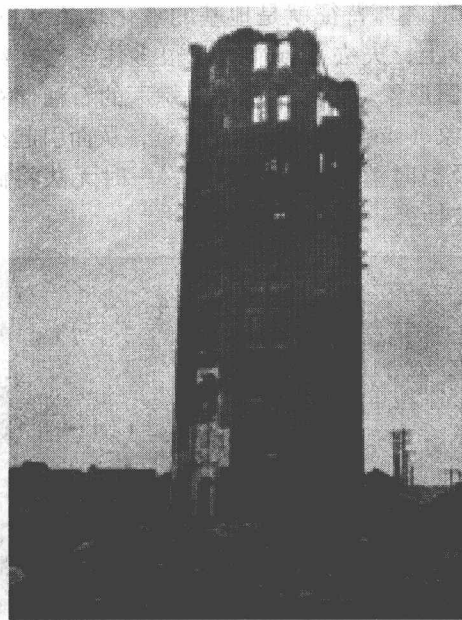
关东大地震引起的倒塌房屋达 36000 栋, 其大部分为木结构房屋。尤其是在东京下町地区, 由于地基软弱, 房屋的倒塌现象更加明显。



(a)



(b)



(c)

图 1-8 关东大震灾

- (a) 地震后的横滨市；(b) 在关东大震灾中遭受破坏的办公楼；
(c) 在关东大震灾中遭受破坏的砖混结构

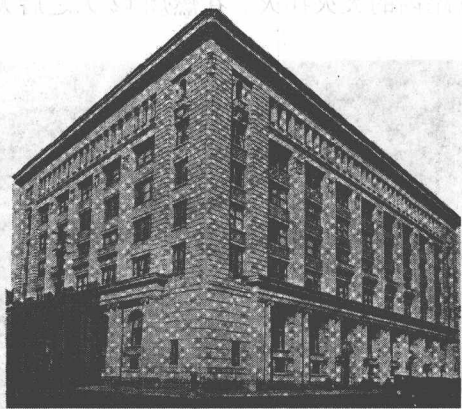


图 1-9 日本工业银行大楼

在这次地震中，一些施工较好的钢筋混凝土结构、钢结构所遭受的损害较小，其抗震性开始受到人们的重视。同时，在这次地震中，砖石结构遭到了毁灭性破坏。以此为契机，砖石结构在日本消失。

值得注意的是，在这次地震中，由内藤多仲博士设计的日本工业银行大楼却没有遭受任何损害。如图 1-9 所示，日本工业银行大楼为一座 7 层钢材 - 钢筋混凝土结构 (steel-reinforced concrete structure, 简称 SRC)，这一大楼的设计特点就是配置了大量的剪力墙。这一结构也是按震度法进行设计的，设计震度为 1/15。所谓钢材-钢筋混凝土结构就是在构件截面内不但要配置钢筋，同时还要配置一些钢结构用的钢材。这是日本独创的一种建筑结构形式，由于具有较好的抗震性、强度及韧性，在这次地震之后得到了很大的发展。

(3) 福井地震

1948 年 6 月 28 日，在日本西部发生了福井地震 (Fukui Earthquake, 震级 $M = 7.3$)。这是一次典型的内陆型浅震源地震，发生于福井平原软弱地基之上。当时，由于战争刚刚结束，很多建筑的设计、施工都很不规范，因此，这次地震给福井市及周围地区带来了巨大的破坏。死者 3769 人，被毁房屋 36000 栋以上。图 1-10 为地震后福井市照片。在这次地震之前，日本地震烈度的最高度数为 6 度。以此次地震为契机，日本气象厅又增设了烈度 7 (0~7 度，共 8 个档次)。

(4) 新潟地震

1964 年 6 月 16 日，在日本中部日本海沿岸的附近海域发生了新潟地震 (Niigata Earthquake, 震级 $M = 7.5$)。地震 15min 之后，高达 4m 的海啸到达新潟市，新潟机场的

跑道被水淹没。如图 1-11 所示, 这次地震最明显的破坏特征就是地基的液化现象 (Liquefaction phenomenon)。由于地基变为液体状态的沙土, 失去承载能力, 很多住宅楼在结构本身没有遭受任何破坏的状态下, 发生倾斜、翻倒现象。另外, 石油提炼厂的石油储存罐内的石油, 在长周期地震的作用下, 发生晃动现象 (sloshing phenomenon), 从而引起火灾, 烧毁了附近 60 多家民房。由于火势太大, 以及当时消防设备的原因, 一时无法将储存罐内的大火扑灭。在燃烧 12 天之后大火才最终被扑灭。



图 1-10 地震之后的福井市

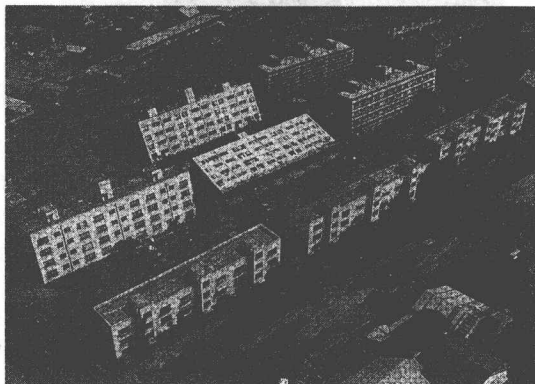


图 1-11 液化化现象引起住宅楼的倾斜、翻倒

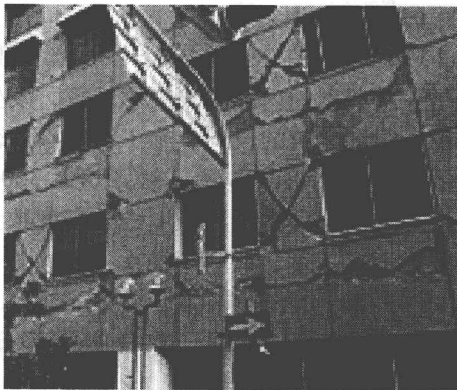
(5) 十胜冲地震

北海道十胜地区是一个多地震区域, 曾数次发生地震, 但以 1968 年 5 月 16 日发生的地震最为有名 (Tokachi-oki earthquake, 震级 $M = 7.9$)。如图 1-12 (a)、(b) 所示, 这次地震的破坏特点就是短柱的剪切破坏。所谓短柱就是指, 由于柱的上下端连接于窗台等非结构墙, 柱的长度相对变短了。这种构造形式常见于学校、医院等公共建筑。如图 1-12 (c) 所示, 长短不同的两根柱, 在发生同一水平变形时, 短柱的变形角 θ_2 、短柱所受的剪力 Q_2 要大于长柱的变形角 θ_1 及长柱所受的剪力 Q_1 。在这种情况下, 短柱将发生剪切破坏。



10

(a)



(b)

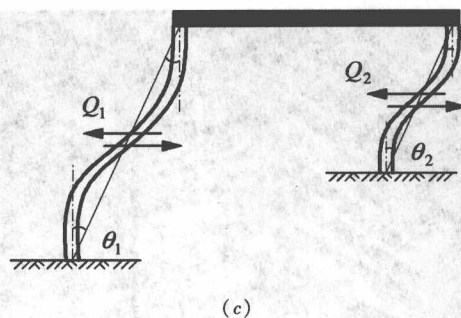


图 1-12 十胜冲地震引起的短柱破坏

(a) 短柱的剪切破坏; (b) 短柱的剪切破坏; (c) 长柱与短柱的变形及所受剪力的关系

(6) 宫城县冲地震

1978 年 6 月 12 日, 在日本东北部的仙台市附近太平洋海域发生了宫城县冲地震 (Miyagi-ken-oki earthquake, 震级 $M = 7.4$)。仙台市附近是地震活动极为频繁的地区, 其活动周期不足 40 年。在这次地震中, 死亡 16 人, 重轻伤 10119 人, 倒坏房屋 4385 栋。

如图 1-13 所示, 位于仙台市的东北大学 (Tohoku University) 工学部建筑学科大楼是一栋 9 层的钢材-钢筋混凝土结构。该结构坐落于青叶山上, 是当时工学部最高的建筑结构。该结构东西方向为框架结构, 南北方向为框架-剪力墙结构。结构的 1 层及 9 层设有加速度地震计。地震时, 该结构 9 层纪录的最大反应加速度竟达 $1.04g$ (g 为重力加速度), 超过重力加速度。这一数值是当时世界上地震计纪录的最大地震反应加速度纪录。在这次地震中, 虽然该结构产生了很大的地震反应, 但并没有引起严重破坏。

如图 1-14 所示, 在这次地震中, 引起了很多下柔上刚式结构的破坏。例如, 底层柱少于上层柱、上层有剪力墙而底层无剪力墙结构。另外, 很多刚度中心与结构重心偏离过大的结构产生了扭转破坏。例如, 一边有剪力墙, 而另一边没有剪力墙的结构。

仙台市是日本东北部最大的海滨城市, 加上近邻的小城市, 总人口达 100 万人以上。这次地震呈现了典型的都市型地震灾害的特点。地震发生时, 高层建筑窗户的玻璃破碎之后, 其碎片飞溅到邻近的道路上, 很多路上的行人被扎伤。由混凝土砌块砌成的围墙, 由于没有或者只有少量的加固钢筋, 所以地震时围墙倒塌, 造成很多人死伤。在这次地震死亡的 16 人中, 有 11 人是被倒塌的围墙压死。

由于地震的影响, 地下管道、电线受到破坏, 很多地方出现了断水、停电以及煤气停止供应等现象。自来水复旧大约 1 周, 煤气复旧大约花费了 1 个月。

在这次地震中还发现, 建筑结构的破坏程度与地基的软硬有很大的关系。地基坚硬的地方, 破坏程度较轻; 而地基松软的地方, 则破坏程度较大。