



普通高等教育“十二五”规划教材

水工结构工程抗震导论

主 编 闫毅志

副主编 杨华舒



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

水工结构工程抗震导论

主 编 闫毅志

副主编 杨华舒



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

全书共分6章。主要内容有：绪论，地震基础知识，工程抗震概论，地震动特性，反应谱，结构地震反应分析。本书根据水工建筑物抗震设计规范（SL 203—97）编写的。

本书为高等学校水利水电工程专业及相关专业教材。本书除作为教材外，还可供水利工程技术人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

水工结构工程抗震导论 / 闫毅志主编. — 北京：
中国水利水电出版社，2011.6
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5084-8685-7

I. ①水… II. ①闫… III. ①水工结构—防震设计—
高等学校—教材 IV. ①TV312

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第115007号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 水工结构工程抗震导论
作 者	主 编 闫毅志 副主编 杨华舒
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: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 7.5印张 178千字
版 次	2011年6月第1版 2011年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	15.00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

2008年5月12日四川省汶川县发生8.0级强烈地震,这次地震是新中国成立以来震级最强、造成的灾害损失最大、抗震救灾难度最大的一次地震,给震区特别是震中附近广大范围内造成重大灾害。此次地震对震区水利水电工程的影响范围和程度也很大,尽管未出现地震致使大坝溃决的情况,但有些工程还是受到严重破坏,甚至面临溃坝风险,给下游人民生命财产和社会经济发展带来严重威胁。因此,进一步开展水利工程抗震相关领域的研究,预防和减轻水利工程因地震引发的严重次生灾害仍是一个十分艰巨的任务。

汶川大地震再次表明,我国作为一个多地震国家,特别是当前水利工程建设重点所在的西部地区,更是高地震烈度区,发生强震的可能性和频度较大。确保水工建筑物的抗震安全,防止严重地震灾害,是我国水利工程建设中一个必须面对的严峻挑战。水工结构工程的抗震安全为国家和社会所高度关注,必须予以充分重视。因此,保证水工结构工程在重大地震灾害中的抗震安全是社会和有关部门的责任。

近年来,虽然我国在水工建筑物抗震研究中已取得了显著进展,为工程建设提供了一定依据,但由于强地震的很多不确定性和水工结构抗震的高度复杂性,仍然存在诸多有待深入研究和解决的关键技术问题。由于没有比较适合水工结构工程抗震方面的教材,作者根据自己的教学资料和经验,编写了本书。

本书是由昆明理工大学闫毅志副教授和杨华舒教授编写。在编写本书过程中得到各兄弟院校和工程单位的大力协助和热情支持,在此一并致谢。对于书中存在的错误和缺点,希望读者批评指正。

编者

2011年5月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 地震对社会的危害	1
1.2 地震对我国的危害	14
1.3 我国政府的地震政策	14
1.4 地震灾害现象	15
1.5 结构震害教训	16
1.6 汶川地震对水利工程建设的审视	17
本章复习思考题	19
第 2 章 地震基础知识	20
2.1 地震基础知识	20
2.2 构造地震的成因	34
2.3 地震自救基本知识	38
本章复习思考题	43
第 3 章 工程抗震概论	44
3.1 地震安全性评价	44
3.2 地震区划	45
3.3 工程结构抗震设防原则	46
3.4 抗震设计极限状态概念	48
3.5 结构抗震设计基本参数	49
3.6 结构抗震设计原则	49
本章复习思考题	50
第 4 章 地震动特性	51
4.1 地震动的观测	51
4.2 地震动的随机过程	55
4.3 地震动特性	60
本章复习思考题	65

第 5 章 反应谱	66
5.1 单自由度体系的地震反应	66
5.2 反应谱与其他频谱的关系	69
5.3 反应谱的特性	72
5.4 设计反应谱	75
本章复习思考题	75
第 6 章 结构地震反应分析	76
6.1 概述	76
6.2 刚性地基上结构的响应	77
6.3 多支座不同干扰时结构的响应	80
6.4 结构与地基的动力相互作用	82
6.5 结构与水体的动力相互作用	95
本章复习思考题	113
参考文献	114

第 1 章 绪 论

本章内容提要

本章主要内容有地震对人类社会的危害性、地震对我国的危害性、我国政府的地震对策、地震灾害现象、地表破坏、工程结构的破坏、结构震害教训。

1.1 地震对社会的危害

地震，是迄今人类力量无法控制的自然灾害。地震灾害号称“群灾之首”，每一次大地震爆发时，都释放出巨大的地震能量，造成地表和人为工程的大量破坏，严重危及人民生命和财产的安全，并造成惨重的经济损失。

据统计，地球上平均每年都要发生近千次的破坏性地震，其中破坏力巨大的灾难性大地震即达十几次，这些地震在它们波及的范围内，均造成惨重的生命财产损失。例如，1976 年我国河北唐山大地震，整个城市在片刻之间即沦为一片废墟，地震造成了 24 万余人丧生，直接经济损失近 100 亿元人民币（按当时的币值计算）。在国外，也有类似的惨重地震灾难记录，比较典型的如 1906 年的美国旧金山大地震和 1923 年的日本关东大地震，前者事件使 7 万余人丧生，后者使 10 万余人死亡，4 万余人下落不明。2008 年 5 月 12 日中国汶川发生了 8.0 级地震，2010 年 4 月 14 日中国玉树发生了 7.1 级地震，2011 年 3 月 11 日日本宫城县以东海底发生 9.0 级地震，又在 4 月 11 日日本福岛县发生 7.0 级地震。即使是在人类对地震知识和工程抗震均取得长足进步的情况下，地震仍然造成了令人触目惊心的惨重损失。近百年来世界各国大地震情况见表 1-1。

表 1-1 近百年来世界各国大地震一览表

名 称	时 间	地 点	震级 (级)	死亡人数
意大利墨西拿大地震	1908 年 12 月 18 日 5 时 25 分	西西里岛墨西拿市	7.5	7.5 万人
日本关东大地震	1923 年 9 月 1 日上午 11 时 58 分	日本横滨、东京一带	8.2	13 万余人
土耳其大地震	1939 年 12 月 27 日凌晨 2 时到 5 时	东部城市埃尔津詹	8.0	5 万人
智利大地震	1960 年 5 月 21 日下午 3 时	智利	8.5	1 万人死亡或失踪
秘鲁大地震	1970 年 5 月 31 日	秘鲁最大的渔港钦博特市	7.6	6 万多人死亡
中国唐山大地震	1976 年 7 月 28 日 3 时 42 分	河北省唐山市	7.8	24.2 万人
墨西哥大地震	1985 年 9 月 19 日上午 7 点 19 分	西部太平洋沿岸 4 个州	7.8	3.5 万人
伊朗大地震	1990 年 6 月 21 日凌晨	西北部	7.3	5 万人

续表

名 称	时 间	地 点	震级 (级)	死亡人数
日本神户大地震	1995 年 1 月 17 日晨 5 时 46 分	日本神户市	7.2	5400 多人
印度洋地震海啸	2004 年 12 月 26 日早 8 点	印尼苏门答腊岛北部	8.9	30 万人
中国汶川地震	2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分	四川汶川县	8.0	69226 人死亡、 17923 人失踪
印尼苏门答腊地震	2009 年 9 月 30 日当地下午	印尼苏门答腊岛海域	7.9	1115 人死亡、 近 210 人失踪
海地地震	当地时间 2010 年 1 月 12 日 16 时 53 分	海地	7.3	约 30 万人丧生
智利地震	当地时间 2010 年 2 月 27 日 3 时 34 分	智利	8.8	507 人
中国玉树地震	2010 年 4 月 14 日 7 时 49 分	青海玉树	7.1	300 人死亡， 8000 人受伤
日本	北京时间 2011 年 3 月 11 日 13 时 46 分	日本本州岛 仙台港以东 130km 处	9.0	
日本	北京时间 2011 年 4 月 11 日 17 时 16 分	日本福岛县和茨城县	7.0	截至 11 日 19 时，地震 海啸灾害已造成 13130 人死亡，13718 人失踪

1906 年美国旧金山大地震，见图 1-1。

1923 年日本关东大地震，见图 1-2。

唐山地震是 20 世纪十大自然灾害之一。1976 年 7 月 28 日 3 时 42 分发生于河北唐山的地震，震级 7.8 级，震中烈度Ⅺ度，见图 1-3。同日 18 时 43 分，在距唐山 40 余 km 的滦县又发生 7.1 级地震，震中烈度Ⅸ度。唐山地震发生在工业城市，人口稠密，损失十分严重。唐山市区建筑物多数基本倒平或严重破坏，铁轨发生蛇形扭曲，地表发生大量裂缝，还有喷水冒沙、塌陷，震前伴有发光现象。242769 人死亡，164851 人受伤。邻近的天津市也遭到Ⅷ~Ⅸ度的破坏。有感范围波及辽宁、山西、河南、山东、内蒙古等 14 个省、自治区、直辖市，破坏范围半径约 250km。震源物理研究表明，该地震的震源错动过程较复杂。

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分 04 秒，汶川县映秀镇南方向约 11km 处（北纬 31°，东经 103°24′）发生里氏 8.0 级特大地震，震源深度 14km。昔日秀美繁华的映秀几乎被夷为平地。

截至 2009 年 4 月 25 日 10 时，汶川大地震遇难 69227 人，受伤 374643 人，失踪 17923 人。其中四川省 68712 名同胞遇难，17921 名同胞失踪，共有 5335 名学生遇难或失踪，直接经济损失达 8451 亿元。

这是新中国成立以来影响最大的一次地震。震级是自 1950 年 8 月 15 日西藏墨脱地震（8.5 级）和 2001 年昆仑山大地震（8.1 级）后的第三大地震，直接严重受灾地区达 10 万 km²。

1.1 地震对社会的危害



(a)



(b)



(c)

图 1-1 1906 年美国旧金山大地震 (San Francisco Earthquake, April 18, 1906)

(a) 地震引发火灾 (次生灾害); (b) 人们从睡梦中惊醒逃难; (c) 城市沦为一片废墟



(a)



(b)



(c)

图 1-2 1923 年日本关东大地震 (Tokyo Earthquake, Sept. 1, 1923)

(a) 地震引发火灾 (次生灾害); (b) 劫后余生; (c) 城市沦为一片废墟

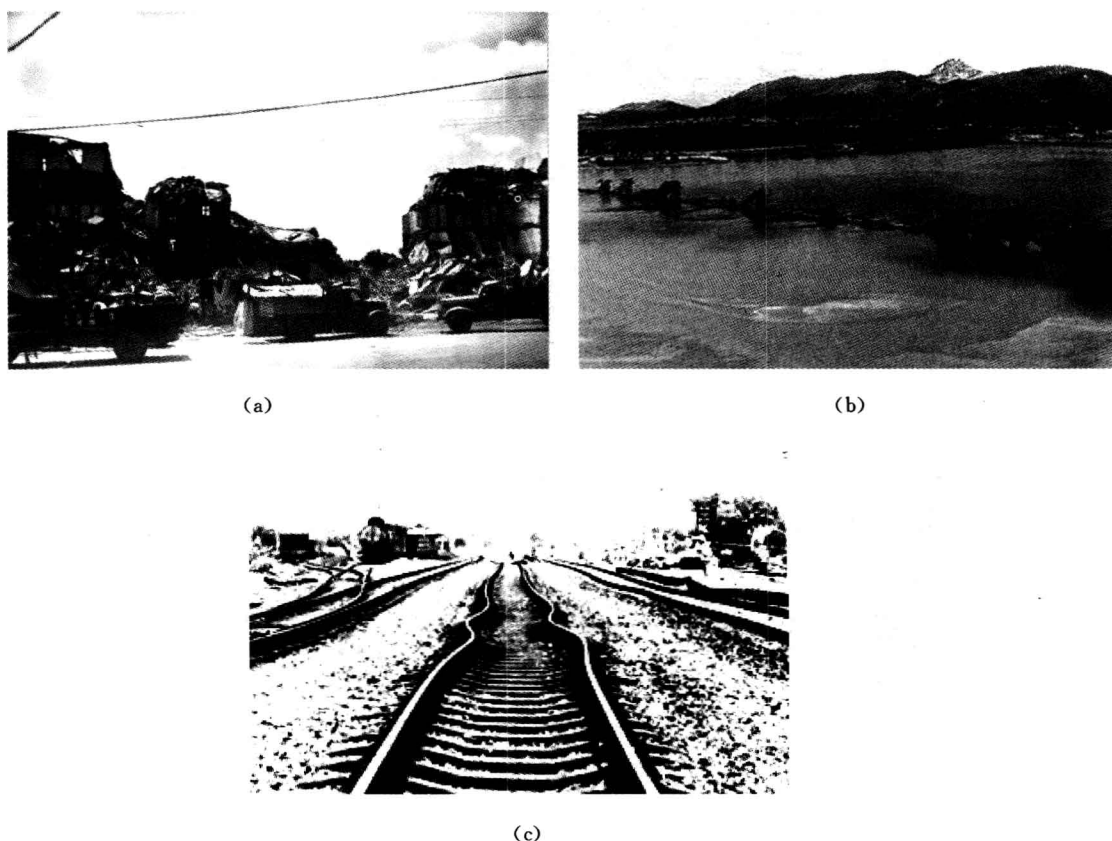


图 1-3 1976 年唐山大地震 (Tangshan Earthquake, July 28, 1976)

(a) 城市一片废墟；(b) 桥梁断裂；(c) 轨道变形

汶川地震使水电站破坏，造成了严重损失：阿坝州岷江流域 130 座水电站受损（不包括紫坪铺电站），受损装机容量 256.85 万 kW，占全州装机容量的 90%，直接经济损失 151.53 亿元，映秀湾、太平驿、福堂、渔子溪一、二级基本全毁。汶川、理电网全面瘫痪，35kW 以上输电线路受损 1638.5km，造成直接经济损失 28.2 亿元。四川省受损水电站 470 余座，装机容量 330 万 kW，10kV 以上停运输电线路 457 条，倒杆（塔）85377 根，断线 31969km。水利部副部长鄂竟平 2008 年 5 月 25 日在国新办新闻发布会上告知，水利设施灾后的修复重建，包括应急除险在内，共需资金 360 亿元。受损电站面临一系列难题：一是不能恢复重建电站的投资回收和职工就业问题严峻；二是刚投入运行电站的还贷和收益受到巨大影响，预期效益难以实现，恢复重建又需大量投入；三是许多大坝受损，厂房、开关站、输电线路受损严重，上游和库区地质环境进一步恶化，运行成本增加。地震造成破坏见图 1-4~图 1-6。

汶川 8.0 级地震发生后，中国地震局组织专家赴四川、甘肃、陕西、重庆、云南、宁夏等省（自治区、直辖市）开展了现场调查，调查面积达 50 万 km²，调查点 4150 个，在实地调查基础上，编绘了汶川 8.0 级地震烈度分布图。



图 1-4 汶川地震后北川县城破坏情况



图 1-5 汶川地震发生后山坡被严重剥蚀



图 1-6 汶川地震发生后太平驿电站漫顶

各烈度区面积和范围如下：

汶川 8.0 级地震Ⅵ度区以上面积合计 440442km²，其中：

Ⅺ度区：面积约 2419km²，以四川省汶川县映秀镇和北川县县城为两个中心呈长条状分布，其中映秀Ⅺ度区沿汶川—都江堰—彭州方向分布，长轴约 66km，短轴约 20km，北川Ⅺ度区沿安县—北川—平武方向分布，长轴约 82km，短轴约 15km。

Ⅹ度区：面积约 3144km²，呈北东向狭长展布，长轴约 224km，短轴约 28km，东北端达四川省青川县，西南端达汶川县。

Ⅸ度区：面积约为 7738km²，呈北东向狭长展布，长轴约 318km，短轴约 45km。东北端达到甘肃省陇南市武都区和陕西省宁强县的交界地带，西南端达到四川省汶川县。

Ⅷ度区：面积约 27786km²，呈北东向不规则椭圆形状展布，东南方向受地形影响不规则衰减，长轴约 413km，短轴约 115km，西南端至四川省宝兴县与芦山县，东北端达到陕西省略阳县和宁强县。

Ⅶ度区：面积约 84449km²，呈北东向不规则椭圆形状展布，东南向受地形影响有不规则衰减，西南端较东北端紧窄，长轴约 566km，短轴约 267km，西南端至四川省天全县，东北端达到甘肃省两当县和陕西省凤县，最东部为陕西省南郑县，最西为四川省小金县，最北为甘肃省天水市麦积区，最南端为四川省雅安市雨城区。

Ⅵ度区：面积约 314906km²，呈北东向不均匀椭圆形展布，长轴约 936km，短轴约 596km，西南端为四川省九龙县、冕宁县和喜得县，东北端为甘肃省镇原县与庆阳市，最东部为陕西省镇安县，最西边为四川省道孚县，最北部达到宁夏回族自治区固原县，最南

为四川省雷波县。

汶川地震烈度说明：

(1) 本次地震的震中烈度达Ⅺ度，以汶川县映秀镇和北川县县城为两个中心。

(2) Ⅸ度以上地区破坏极其严重，其分布区域紧靠发震断层，沿断层走向成长条形状；Ⅹ度和Ⅸ度边界受龙门山前山断裂错动的影响，在绵竹市和什邡市山区向盆地方向突出，都江堰市区也略有突出。

(3) 在山前盆地边缘的过渡带，烈度向东衰减很快，而西侧则衰减相对较缓。

(4) 烈度分布南北也不对称，Ⅷ度区和Ⅶ度区范围向四周扩大，且相同烈度的区域在北部比南部大，进入甘肃省和陕西省境内，显示出断层破裂向北东方向传播，最大余震发生在断层北部。

(5) Ⅵ度区在四川盆地和丘陵地区分布范围很广，一直延续到重庆市西部和云南省昭通市北端，在四川省西部面积相对要小。

(6) 此次地震有多个烈度异常区，其中汉源为位于Ⅵ度区的Ⅷ度异常区，其余均为高于所在区一度的异常区，包括：康县（Ⅸ度异常区）、中江（Ⅷ度异常区）、通江（Ⅶ度异常区）、洪雅（Ⅶ度异常区）、宝鸡—岐山—眉县（Ⅶ度异常区）、西安（Ⅵ度异常区）。

北京时间 2010 年 4 月 14 日 7 时 49 分许，青海省玉树藏族自治州玉树县（北纬 33.1°，东经 96.1°）发生 7.1 级地震，震源深度 14km。据中国地震台网中心预报部主任刘杰介绍，截至 14 日下午 14 时，青海玉树县 7.1 级地震已经发生 18 次余震，未来震区余震活动频繁。截至 19 日 8 时，中国地震局台网共记录到玉树地震余震总数为 1206 次，其中 3.0 级以上余震 12 次。截至 4 月 20 日 10 时，玉树地震遇难人数为 2046 人，失踪 193 人，受伤 12135 人，其中重伤 1434 人。地震破坏见图 1-7～图 1-9。



图 1-7 玉树地震后县城成一片废墟



图 1-8 搜救人员在寻找幸存者



图 1-9 居民房屋成废墟

玉树地震和汶川地震的情况对比见表 1-2。

表 1-2 玉树地震和汶川地震的对比

	玉 树 地 震	汶 川 地 震
时间	2010 年 4 月 14 日 7 时 49 分	2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分
地点	青海省玉树藏族自治州玉树县（北纬 33.2°，东经 96.6°）	四川省汶川县映秀镇（北纬 30.986°，东经 103.364°）
震源深度	14km	14km
余震状况	截至 2010 年 4 月 14 日 15 点 36 分，玉树震区已经发生了 18 次余震，1 次 5 级，1 次 6.3 级。余震次数还在不停增加	截至 2008 年 5 月 20 日 11 时，汶川 8.0 级地震共发生余震 7000 多次。其中 4 级以上余震 159 次，其中 5 级以上 26 次，6 级以上 4 次，仍然持续增加
强度对比	7.1 级左右，初步估计破裂长度 30km 左右，烈度Ⅸ度	震级 8.0 级，破裂长度 300km，烈度Ⅺ度
地震类型	走滑型地震，在相对竖直的断层上，破坏不长，就像两辆车发生摩擦刚蹭	以逆冲为主，断层面像斜坡一样，破坏程度既长又宽，就像两车相撞，撕扯严重
地块运动	两个地块间的距离没有发生变化，是左右发生了平移	使两个地块间的距离缩短了，是硬生生挤出来的，大概向青藏高原推进了若干米
运动速度	玉树地区断层滑动比汶川快得多	断层运动速度比较慢，缓慢的积累能量，以前重视不够，汶川地震是几千年或者上万年来一次
所处板块	甘孜—玉树—风火山断裂带，属于巴颜喀拉地块南边界	处在我国的一个大地震带——南北地震带上，是四川盆地和青藏高原的分界线，为龙门山断裂带，属于巴颜喀拉地块东南边界
前震现象	有前震，地震之前发生了 4.7 级地震	如唐山地震一样，没有前震
伤亡	截至 2010 年 5 月 30 日，玉树地震已造成 2698 人遇难，其中已确认身份 2687 人。遇难学生 199 人	汶川地震遇难 69225 人，受伤 374176 人，失踪 17923 人，治疗 96402 人
受灾区域	青海省玉树藏族自治州玉树县，称多县，四川甘孜州	四川成都，都江堰，绵阳，德阳，广元，阿坝州，北川，绵竹，青川县，汶川县均为主要受灾地区。甘肃天水、陇南等地有震情发生
波及范围	青海玉树地震对四川部分地区带来影响，四川甘孜州石渠、白玉等地震感较为明显	除了四川外，陕西，河南，湖北，重庆等四省市出现伤亡，大半个中国均有震感
震区地理	玉树属于高海拔地区，地形以山地为主，平均海拔 4493m。通天河、扎曲、巴曲流经此地	汶川地区，是世界上最大的地理褶皱区，位于四川盆地西部边缘，南低北高，沿岷江河谷，呈东北西南向，河谷山岭相对高差悬殊，地形复杂，属典型的高山峡谷地形
震区气候	预计未来两天，玉树震区没有降水天气出现，天气形势总体有利于抗震救灾。2010 年 4 月 14 日，青海省玉树藏族自治州玉树县以多云天气为主，最低气温为零下 1.5℃，灾区目前刮起六七级大风，救援困难	汶川地震发生后，灾区普遍降雨，山洪暴发，使救援变得极为艰难。如，2008 年 5 月 14 日，绵竹县普降大雨，临近龙门山脉的清平乡、天池乡、金城镇随时有爆发山洪的危险

1.1 地震对社会的危害

续表

	玉树地震	汶川地震
救灾响应	1级	1级
震区建筑	玉树灾区建筑多为土木结构，玉树县城强震后土木结构房屋几乎全部倒塌	汶川灾区建筑多为砖石结构。地震曾造成四川绵竹市包括两所幼儿园在内的7所学校倒塌，1700人被埋。其他灾区也有大量学校垮塌
震区交通	玉树属于高海拔地区，医疗设施不足，距离省会有800km且交通不便，这些将会成为救援遇到的极大困难	汶川地震后，灾区交通大部分中断，由于雨量较大，到处是塌方险情
震区通信	截至2010年4月14日下午14时许，玉树震区的移动和固定电话通信已基本中断	灾区交通和通信完全中断，省会成都通信基本中断。地震发生后，市民拨打手机了解情况都无法接通

2011年3月11日13时46分（北京时间）发生在西太平洋国际海域的日本里氏9.0级地震，震中位于北纬38.1°，东经142.6°，震源深度约10km，在当日内累计发生余震64次，其中最高为7.1级，最低为4.1级。地震对日本地面建筑物造成严重破坏，并引发火灾，如图1-10、图1-11所示。日本气象厅随即发布了海啸警报称地震将引发约6m高海啸，后修正为10m。根据后续研究表明海啸最高达到23m，地震引发的海啸波及从北海道到冲绳的大范围地区。日本防卫省称，离震中较近的福岛县南相马市约1800户人家遭受毁灭性打击，死者预计将超过千人。灾区很多房屋在地震中倒塌烧毁，还有一些被海啸冲走，损失惨重。宫城县气仙沼市的县立气仙沼向洋高中建筑物4楼以下全部被水淹没。该县名取市和石卷市的沿海地区众多民房被海啸卷走，造成大量人员失踪。海啸造成破坏如图1-12、图1-13、图1-14所示。日本福岛第一核电



图1-10 日本2011年3月11日地震对建筑物的破坏