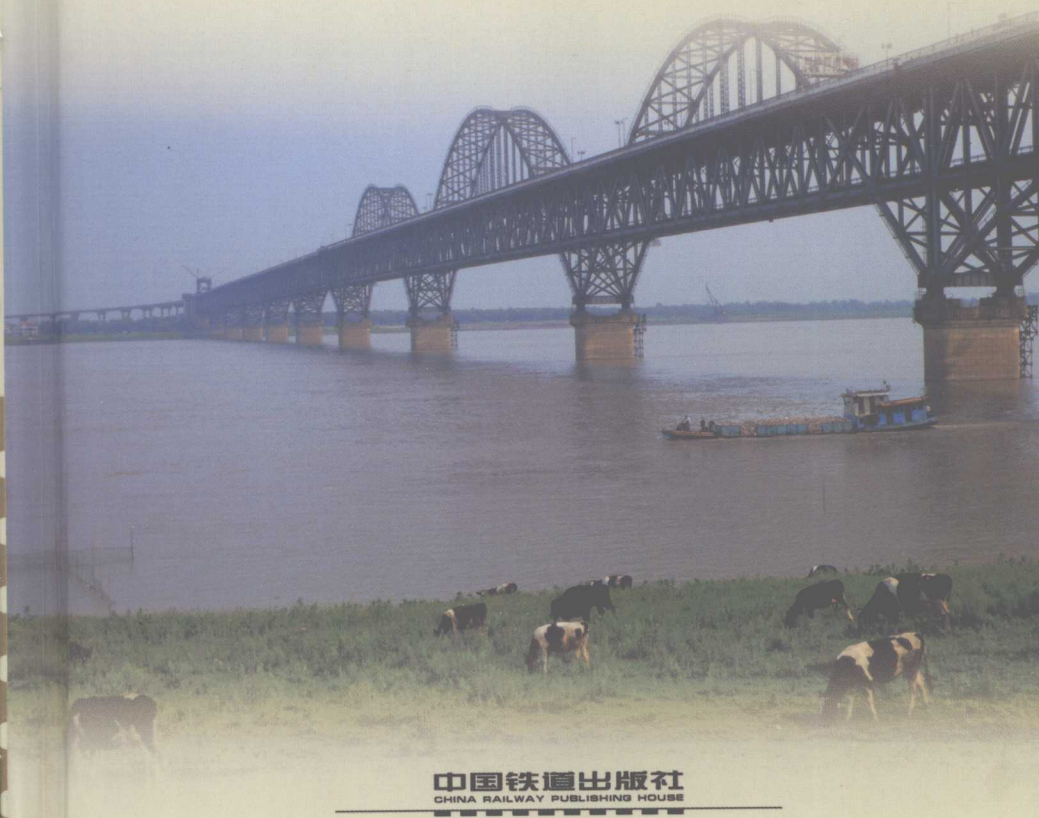


西部交通建设科技项目资助

# 桥梁抗震研究

王克海 编著



中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

# 桥梁抗震研究

王克海 编著



中国铁道出版社

2007年·北京

## 内 容 简 介

本书详尽介绍了我国地震活动情况、国内外桥梁震害资料、基于抗震性能的设计概念,综述了桥梁抗震计算与抗震评价方法,用实例形式阐述了梁桥的抗震分析技术,结合本书作者攻读硕士、博士学位期间的研究成果阐述了斜拉桥抗震与减震技术,结合实例介绍了高墩抗震分析方法及减震措施,详细比较了国内外几个桥梁抗震规范,详细论述了桩-土-结构动力相互作用的研究方法和桥梁抗震加固技术,简要介绍了作者开发的桥梁抗震可视化智能软件。

本书可供桥梁设计、科研人员使用,也可作为在校硕士、博士研究生等人的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

桥梁抗震研究/王克海编著. —北京:中国铁道出版社,

2007. 6

ISBN 978-7-113-07977-2

I. 桥… II. 王… III. 桥梁结构-抗震设计-研究  
IV. U442. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 086143 号

书 名:桥梁抗震研究

作 者:王克海

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:张悦

封面设计:马利

印 刷:北京市兴顺印刷厂

开 本:850 mm×1 168 mm 1/32 印张:18 字数:472 千

版 本:2007年6月第1版 2007年6月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-113-07977-2/TU·883

定 价:46.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话:010-51873656 发行部电话:010-63573611

# 前 言

我国位于世界上两大地震带——环太平洋地震带和亚欧地震带之间,是全球大陆区域中最活跃的地震区之一。目前我国经济建设迅速发展,同时也带动了公路工程、铁路工程及市政工程等的发展,可以说当今世界上最大的土木工程建设在中国。在公路、铁路、市政工程等中,桥梁是生命线工程,国内外大量震害资料一再证明了桥梁抗震研究的重要意义。

作者 1989 年师从著名抗震专家朱晞教授攻读硕士、博士学位,开始进入桥梁抗震领域,之后有机会于 1999 年师从著名抗震专家范立础院士做博士后研究工作。2001 年到交通部公路科学研究院工作,很荣幸有机会作为第二承担单位项目负责人完成了交通部“西部交通建设科技项目——桥梁抗震性能评价及抗震加固技术研究”其中两个子项目(本课题共五个子课题)的研究,同时完成了 20 余座桥梁设计中的抗震咨询项目。本书是在总结作者上述几个阶段的研究成果的基础上完成的,全书共分 12 章,第 1 章简要介绍了我国的地震活动情况;第 2 章简要介绍了国内外一些大地震中桥梁的震害情况;第 3 章从不同角度叙述了地震工程学的发展状况;第 4 章综述了桥梁抗震计算与抗震评价方法;第 5 章介绍了基于性能的抗震设计;第 6 章分析了梁桥的抗震实例;第 7 章介绍了斜拉桥抗震与减震研究,本章融入了作者攻读硕士、博士学位期间的研究成果;第 8 章介绍了高墩抗震分析及减震措施研究;第 9 章介绍了国内外几个桥梁抗震规范的比较;第 10 章介绍了桩-土-结构动力相互作用;第 11 章介绍了桥梁抗震加固技术;第 12 章主要介绍桥梁抗震可视化的思路和作者组织开发的“桥梁抗震可视化智能系统”。本书一些章节有作者的体会和见解,一些是作者多年来从事抗震研究的研究成果,作者希望本书能

为从事土木工程科研、教学、设计、施工人员提供一些指导和帮助。

作者衷心感谢著名抗震专家朱晞教授和范立础院士两位恩师的悉心指导和辛勤培养。感谢同事李茜硕士协助整理了全书的稿件,韦韩硕士整理了第12章的稿件,季金文硕士整理了第6章的稿件。感谢交通部公路科学研究院的院领导、科教处领导、道桥部领导对我工作的支持。

我想借本书出版之机感谢我的妻子十多年来对我学业和工作的支持。

由于作者学识有限,偏见、疏忽、不当之处在所难免,恳请读者批评指正(邮箱:kehaiwang@263.net 或 kh.wang@rioh.cn)。

特别需要说明的是:本书的出版得到西部交通建设科技项目和交通部公路科学研究院创新基金的资助。

王克海

2006年12月于北京

# 目 录

第 1 章 我国地震活动概况	1
1.1 我国地震活动的基本特征	1
1.2 1949~1981 年我国地震活动的概况分析	3
1.2.1 地震活动基本特征	3
1.2.2 地震灾害情况	5
1.3 1982 年以来我国地震活动概况	7
1.4 本章小结	25
第 2 章 桥梁震害	28
2.1 典型地震及桥梁震害	28
2.1.1 1923 年日本关东大地震	28
2.1.2 1960 年智利地震	30
2.1.3 1976 年唐山地震	31
2.1.4 1989 年美国 Loma Prieta 地震	50
2.1.5 1994 年美国 Northridge 地震	59
2.1.6 1995 年日本阪神地震	66
2.1.7 1999 年土耳其地震	77
2.1.8 1999 年中国台湾集集地震	79
2.1.9 2004 年日本新潟地震	85
2.1.10 其他地震中的桥梁震害	87
2.2 桥梁震害内因	94
2.2.1 桥梁上部结构震害	95
2.2.2 桥梁支座震害	95
2.2.3 桥梁下部结构震害	95
2.2.4 桥梁基础震害	96
2.3 本章小结	96

<b>第 3 章 国内外地震工程学发展</b> .....	99
3.1 地震工程学发展的几个阶段 .....	99
3.1.1 第一阶段——地震工程学发展的萌芽阶段 .....	99
3.1.2 第二阶段——地震工程学发展的成熟阶段 .....	101
3.1.3 第三阶段——地震工程学发展的扩展阶段 .....	103
3.1.4 其他划分 .....	106
3.2 现阶段地震工程学发展情况 .....	107
3.3 我国地震工程学发展研究 .....	118
3.3.1 创建阶段 .....	118
3.3.2 发展阶段 .....	119
3.3.3 横向发展阶段 .....	121
3.4 国内外生命线地震工程的研究 .....	122
3.5 本章小结 .....	125
<b>第 4 章 桥梁抗震计算与抗震性能评价方法综述</b> .....	131
4.1 结构抗震动力学基本概念 .....	131
4.1.1 运动方程 .....	131
4.1.2 结构动力特性 .....	133
4.2 桥梁结构地震反应分析方法 .....	135
4.2.1 静力阶段 .....	135
4.2.2 反应谱法 .....	139
4.2.3 动态时程分析法 .....	149
4.2.4 随机振动方法 .....	164
4.2.5 分析和设计方法总结 .....	166
4.3 桥梁抗震性能评估及分析方法 .....	168
4.3.1 确定加固优先权 .....	168
4.3.2 结构抗震性能评估分析 .....	170
4.4 非线性静力弹塑性分析 .....	171
4.4.1 能力谱方法 .....	171
4.4.2 位移影响系数法 .....	175
4.4.3 适应谱 Pushover 方法 .....	177

4.4.4	模态 Pushover 分析方法	179
4.4.5	基于模态分析的 Pushover 方法	182
4.5	本章小结	192
<b>第 5 章</b>	<b>基于性能的抗震设计</b>	<b>196</b>
5.1	基于性能的抗震设计基本概念	197
5.1.1	定义	197
5.1.2	研究内容	198
5.1.3	特点	200
5.2	基于性能的抗震设计方法	201
5.2.1	基于位移的抗震设计方法(DBSD)	201
5.2.2	综合设计方法	206
5.2.3	基于性能的可靠度设计方法	207
5.3	基于性能(多水平性能目标)的既有桥梁 抗震性能评价	207
5.4	本章小结	209
<b>第 6 章</b>	<b>梁桥抗震分析实例</b>	<b>213</b>
6.1	梁桥结构特点	213
6.1.1	简支梁桥结构特点	213
6.1.2	连续梁桥结构特点	214
6.1.3	连续刚构桥结构特点	215
6.2	梁桥震害特点及其原因分析	216
6.3	简支梁桥抗震分析	218
6.3.1	实例一	218
6.3.2	实例二	226
6.3.3	实例三	229
6.3.4	简支梁桥抗震设计及构造措施	231
6.3.5	简支梁桥有限元建模	237
6.4	连续梁桥抗震分析	237
6.4.1	实例	237
6.4.2	连续梁桥抗震设计及构造措施	251



6.4.3	连续梁桥有限元建模 .....	253
6.5	连续刚构桥抗震分析 .....	256
6.5.1	实例 .....	256
6.5.2	连续刚构桥抗震设计及构造措施 .....	260
6.5.3	连续刚构桥的抗震特点 .....	261
6.6	本章小结 .....	263
<b>第7章</b>	<b>斜拉桥抗震分析及减震研究</b> .....	<b>265</b>
7.1	斜拉桥的历史与发展概况 .....	265
7.2	斜拉桥几何非线性分析方法 .....	277
7.2.1	斜拉索非线性刚度矩阵 .....	278
7.2.2	描述梁-柱效应的刚度矩阵 .....	280
7.2.3	描述大变形的刚度矩阵 .....	292
7.2.4	斜拉桥几何非线性有限元方程的数值解法 .....	292
7.2.5	斜拉桥几何非线性静力分析过程 .....	293
7.2.6	实例分析 .....	295
7.3	斜拉桥结构动力分析 .....	298
7.3.1	斜拉桥结构自振特性分析 .....	299
7.3.2	斜拉桥结构一致激励的地震反应分析 .....	306
7.3.3	斜拉桥结构多支承激励的地震响应分析 .....	323
7.4	斜拉桥结构减震技术 .....	331
7.4.1	被动控制 .....	331
7.4.2	主动控制 .....	339
7.4.3	斜拉桥结构基于模态分析的减震控制 .....	343
7.4.4	非线性结构的滑动状态控制 .....	366
7.5	本章小结 .....	370
<b>第8章</b>	<b>高墩桥梁的地震反应研究</b> .....	<b>374</b>
8.1	高墩桥梁建设概况 .....	374
8.2	高墩桥梁地震反应分析方法 .....	376
8.2.1	高墩桥梁动力反应谱分析 .....	377
8.2.2	高墩桥梁动态时程分析法 .....	378

8.2.3	考虑 P- $\Delta$ 效应的高墩抗震计算 .....	379
8.3	高墩桥梁地震反应特点 .....	381
8.4	高墩桥梁抗震分析工程实例 .....	382
8.5	本章小结 .....	391
<b>第 9 章</b>	<b>国内外桥梁抗震规范的介绍</b> .....	<b>395</b>
9.1	抗震性能设防目标 .....	395
9.2	设计地震动 .....	401
9.2.1	地震动区划 .....	401
9.2.2	场地分类 .....	403
9.2.3	地震设计谱 .....	404
9.2.4	阻尼修正 .....	413
9.3	地震反应分析和计算方法 .....	415
9.4	延性设计 .....	424
9.5	约束和减震、耗能设计 .....	434
9.6	本章小结 .....	435
<b>第 10 章</b>	<b>桩-土-结构动力相互作用</b> .....	<b>437</b>
10.1	土-结构动力相互作用的概念及发展阶段 .....	437
10.2	土-结构动力相互作用的分析方法 .....	439
10.3	桩-土-结构动力相互作用机理 .....	441
10.3.1	土体响应 .....	443
10.3.2	运动响应 .....	444
10.3.3	惯性响应 .....	444
10.3.4	分析方法 .....	444
10.3.5	桩-土-结构动力相互作用的集中质量法 .....	461
10.4	本章小结 .....	469
<b>第 11 章</b>	<b>桥梁抗震加固技术</b> .....	<b>473</b>
11.1	桥梁结构抗震加固的概念 .....	473
11.1.1	桥梁结构主要震害 .....	473
11.1.2	国内外抗震加固情况 .....	474
11.2	上部结构抗震加固方法 .....	478

11.2.1	支座与伸缩缝的加固措施·····	478
11.2.2	上部结构抗弯能力的加固措施·····	490
11.2.3	上部结构抗震加固实例·····	492
11.3	桥墩、盖梁和节点的加固方法·····	494
11.3.1	混凝土墩的加固方法·····	494
11.3.2	盖梁的加固方法·····	506
11.3.3	桥墩抗震加固实例·····	511
11.4	基础的加固方法·····	514
11.4.1	承台·····	514
11.4.2	桥台·····	518
11.5	不良地质区桥梁的加固措施·····	520
11.5.1	横跨或靠近断层的桥梁·····	520
11.5.2	位于或靠近不稳定边坡的桥梁·····	521
11.5.3	位于可液化土层上的桥梁·····	521
11.5.4	不良地质区桥梁抗震加固实例·····	524
11.6	运用抗震保护系统的加固方法·····	525
11.6.1	减隔震原理·····	525
11.6.2	设计目的·····	528
11.6.3	隔震支座·····	528
11.6.4	适合使用隔震系统的桥梁·····	529
11.6.5	桥梁位移·····	529
11.7	本章小结·····	530
<b>第 12 章</b>	<b>桥梁抗震计算可视化·····</b>	<b>532</b>
12.1	计算机仿真和科学计算的可视化技术·····	532
12.2	桥梁抗震软件开发技术·····	538
12.2.1	国内外桥梁 CAD 现状·····	539
12.2.2	面向对象的程序设计·····	540
12.2.3	软件构件对象模型·····	542
12.2.4	ActiveX Automation 技术·····	543
12.2.5	工程数据库管理系统·····	544

12.3	BAS 系统总体介绍 .....	544
12.4	BAS 系统前处理介绍 .....	547
12.4.1	几何建模生成有限元模型 .....	547
12.4.2	直接建立有限元模型 .....	549
12.4.3	截面建立 .....	552
12.4.4	与 AutoCAD 的无缝接合 .....	554
12.5	BAS 后处理介绍 .....	556
12.5.1	输出形式 .....	556
12.5.2	输出内容 .....	557
12.6	算例 .....	558
12.7	几点体会 .....	560

# 第 1 章 我国地震活动概况

我国位于世界上两大地震带,即环太平洋和亚欧地震带之间,是全球大陆地区中最活跃的地震区之一。地震在空间上往往沿着构造活动带呈带状分布,形成地震带。我国境内有 23 个地震带,东部主要有郯城—庐江地震带、河北平原地震带、陕西汾渭地震带、燕山—渤海地震带、东南沿海地震带;西部主要有北天山地震带、南天山地震带、祁连山地震带、昆仑山地震带、喜马拉雅山地震带;中部有斜穿大陆腹地的南北地震带。另外还有我国台湾地震带,属西太平洋地震带的一部分。有史以来,我国的地震活动频繁。据历史记录,破坏性地震数以千计,造成了严重的灾害,在水、旱、震、风、虫、雹和瘟疫等七大自然灾害中占很大的比重。纵观近两千多年我国的地震活动情况,我国地震活动具有频次高、强度大且分布广的基本特点。本章将对我国地震活动的基本特性及新中国成立以来的地震活动特点以及震害情况作简要综述。

## 1.1 我国地震活动的基本特征

### (1) 我国地震活动具有频次高、强度大的特点

我国历史上关于地震的记载十分丰富。但是由于各历史时期、各地区文化发展程度的不同,地震记载的详尽程度亦不相同。例如,公元 1500 年以前的记载不多,主要集中在黄河中下游和长江中下游地区,明代开始才较为丰富,公元 1900 年以前,我国西部地区的记载仍然较少。1900 年至今的 100 余年,特别是 20 世纪 30 年代以来,由于有了地震记录仪,我国地震资料已趋于完整和系统化。

根据上述情况,20 世纪以前的地震资料均以历史文献记载及部分考察为主,而 20 世纪以来的地震资料,则以仪器记录和现场

考察为主,两个阶段资料的完整情况有着明显差异(特别是对6级以下的中强地震)。分别统计1900年前后我国地震活动的基本情况,其结果如下:

1900年以前有记录的地震:共发生8级以上地震8次,最大地震为1668年在山东莒县、郯城间发生的8.5级地震;7.0~7.9级地震32次;6.0~6.9级地震144次;4.75级以上地震共581次。

1900~1988年共发生8级以上地震9次,其中,我国大陆7次,台湾地区2次,最大地震为1950年发生在西藏察隅附近的8.6级地震和1920年发生在宁夏海原的8.5级地震;7.0~7.9级地震94次,其中,大陆59次,台湾地区34次;6.0~6.9级地震446次,其中,大陆271次,台湾地区175次;共发生4.75级以上地震约3756次。

1989~2000年未发生8级地震;共发生7级以上地震11次,其中大陆及近海发生7次,台湾地区4次;6级以上地震共106次,其中,大陆及近海发生66次;5级以上地震发生528次,其中,大陆及近海发生32次。

按上述统计结果,20世纪以来,我国7级以上地震的年平均发生率为1.14次/年,其中,大陆为0.73次/年,台湾地区为0.4次/年;6级以上地震的年平均发生率为5.52次/年,其中,大陆为3.37次/年,台湾地区为2.15次/年。

从上述情况不难看出,我国的地震活动具有频次高、强度大的特点。与全球地震活动相比,我国强震活动占较大的比例。例如,1897~1977年期间,全球共发生7级以上地震1529次,平均每年发生18.9次,其中我国约占6.5%,而在全球陆地的地震中,我国强震所占的比例明显增大,约占1/4~1/3。

我国的地震分布十分广泛。除浙江、贵州两省外,其他各省和自治区皆有6级以上强震发生,其中的18个省和自治区均发生过7级以上大震,台湾地区是我国地震活动频繁发生的地区之一,在1901~1988年全国549次6级以上地震中,台湾地区为212次,占

38.6%。我国大陆的地震活动主要分布在青藏高原、新疆及华北地区,而东北、华东、华南等地区分布较少。绝大部分地区的地震主要是浅源地震,东部地震的震源深度一般在 30 km 之内,西部地区则在 50~60 km 以内,而中源地震则分布在靠近新疆的帕米尔地区(100~160 km)和台湾附近(最深为 270 km),深源地震很少,只发生在吉林、黑龙江东部的边境地区。

## (2) 我国地震活动具有起伏式发展的韵律特征

地震活动随时间呈现不均匀的分布,具有相对平静期和活跃期相互交替转化的发展过程。地震频度低、强度小、强震相对平静的时段可称为平静期,而地震频度高、强度大、强震相对活跃的时段称为活跃期,按此原则可将我国各主要地震区的地震活动起伏特点加以划分。各地震区呈现的平静—活跃—平静过程具有较为清晰的韵律特点,各地震区的活动水平亦有较大的差异,台湾及青藏南部地震活动期的时间较短,为几十年,新疆中部和青藏中部的活动期为百年左右;而华北、青藏北部的活动期较长,约为 300~400 年。20 世纪我国大陆的强震活动大体可以分为平静幕平均为 14 年和活跃幕平均为 16 年的 3~4 个轮回。

不同地震活跃期中的强震活动有着各自相对集中的地区,即活动主体地区,而且伴随活跃期的演变,其活动主体地区也发生明显的转移。20 世纪初我国 7 级以上地震集中在新疆西北部,第二活跃期转移到甘、宁至新疆北部,第三活跃期的强震以青、藏地区为主,而第四活跃期出现在四川、贵州和华北部的两个集中区。强震活动主体地区的规律性变化与我国内陆构造块体的区域应力场的调整 and 变化及板块边界的动力因素有关。

## 1.2 1949~1981 年我国地震活动的概况分析<sup>[1]</sup>

### 1.2.1 地震活动基本特征

自 1949 年新中国成立到 1979 年底的 30 年间,全国共发生 8 级以上地震 3 次;7.0~7.9 级地震 44 次;6.0~6.9 级地震 215

次;4.75级以上地震约2510次。其中,大陆共发生7级以上地震27次,平均每年发生0.90次;6级以上地震167次,平均每年发生5.22次。与20世纪100余年的活动水平相比(即7级以上地震的年均值为0.75次,6级以上地震年均值为3.83次),本阶段的强震活动水平明显高于前50年的活动水平。其活动状况,有以下几个主要特点:

(1)经历了两个明显的起伏活动过程

地震活动有着显著的韵律特征:1947~1955年是20世纪我国大陆强震活动的第三个轮回(周期)中的活跃幕,这个活跃幕持续了9年,这是20世纪我国大陆地震活动水平最高的一个时段,共发生8级地震2次(1950年西藏察隅8.6级和1951年西藏当雄8.0级),7.0~7.9级地震11次。1956~1965年是强震相对平静的阶段,只发生1次7级地震,年释放能量的平均值约为前一个活跃幕年均值的1.8%;自1966年开始,我国陆区的强震活动进入了第四个活跃幕,先后持续了11年,共发生7级以上地震15次,最大地震为7.8级(1976年唐山);与第三个活跃幕的活动水平相比较,6级以上地震无论是最大强度、还是释放能量都明显偏低,唯有7级以上地震的总频次仍保持较高的水平。1977~1984年,我国陆区的强震活动又趋于平静,没有7级以上地震发生;以1985年新疆乌恰地震为起点,我国大陆又开始了一个新的强震活跃时段,至1990年已发生7级以上地震4次。

(2)强震分布显示了西部多、东部少的突出差异

分析1949~1981年底全国6级以上地震的分布情况,可以明显看出在大陆各地区,强震的绝大多数主要分布在东经 $107^{\circ}$ 以西的西部地区,而东部地区较少。据统计,在此期间发生的27次7级以上地震中,西部为20次,占74%,而东部只有7次,占26%,对于6级地震,东部所占的比例则更少。据统计,在1895~1985年期间我国陆区发生的全部7级以上地震中,西部占87%,其应变释放占90.8%,因此,建国后50多年的强震分布特点与较长时间的状况是大体一致的。



(3)强震活动继承了我国地震活动分布广、不均匀的基本特点

我国地震活动具有分布广的特点,6级以上地震几乎遍布全国。建国以来,这一特点仍然很明显,全国有16个省和自治区发生过6级以上地震,占53%;有12个省和自治区发生过7级以上地震,占40%。然而,地震活动的分布是不均匀的,其活动水平亦有较大的差异。据统计分析(见表1-1),台湾、西藏、新疆、云南、四川、青海、河北集中了1949~1981年发生的绝大多数强震,其中,6级以上地震占总数251次的92%,7级以上地震占总数46次的87%。显然,1949~1981年,我国地震活动呈现明显的西多、东少,分布极不均匀的特点。

表 1-1 1949~1981 年间 7 个省和自治区地震活动情况

省或自治区	震级	次数	省或自治区	震级	次数
台湾	6级以上	90	云南	6级以上	28
	7级以上	19		7级以上	5
西藏	6级以上	45	四川	6级以上	18
	7级以上	4		7级以上	4
新疆	6级以上	29	青海	6级以上	13
	7级以上	4		7级以上	1
河北	6级以上	8	合计	6级以上	231
	7级以上	3		7级以上	40

### 1.2.2 地震灾害情况

我国大陆的地震活动绝大多数为浅源地震,因此,历史上数以百计的强震均造成了不同程度的震害。新中国成立后的30余年(1949~1981年),经历了两个强震活跃的阶段,大陆发生的数百次破坏性地震,给人民的生命、财产和国家的经济建设造成了严重的灾害。据统计,自1949年10月至1981年12月,我国大陆有95次5级以上地震造成了不同程度的破坏和损失,涉及22个省和自