



▲ 模型中的站点位置分类示意



▲ 基本单元位于基本单元中的站点示意



▲ 1973-2012年地震位置图



▲ 一维剪切波传播模型



城市建设综合教材丛书

丛书主编 李引擎

# 城市区域灾害防御 理论与技术

郭小东 等 编著 张靖岩 主审



▲ 城市地下空间进水藕断丝连



▲ 不同地下空间与建筑的空间对应关系

▲ 城市地下排水管网子模型



▲ 建筑倒塌北角度

上海科学技术出版社

中国  
城市区域灾害防御  
理论与技术

王德胜 主编



图书在版编目 (C I P) 数据

城市区域灾害防御理论与技术 / 郭小东等编著. --  
上海 : 上海科学技术出版社, 2023. 11  
(城市建设综合防灾丛书)  
ISBN 978-7-5478-6357-2

I. ①城… II. ①郭… III. ①城市—灾害防治 IV.  
①X4

中国国家版本馆CIP数据核字(2023)第197877号

---

城市区域灾害防御理论与技术  
郭小东 等 编著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行  
上海科学技术出版社  
(上海市闵行区号景路 159 弄 A 座 9F-10F)  
邮政编码 201101    www.sstp.cn  
印刷

开本 787×1092 1/16 印张 15.5  
字数 330 千字  
2023 年 11 月第 1 版 2023 年 11 月第 1 次印刷  
ISBN 978-7-5478-6357-2/TU·340  
定价: 108.00 元

---

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向印刷厂联系调换

# 编撰人员名单

丛书主编

李引擎

本书编撰人员

朱立新 孙 旋 李 娜 王 静

张念强 于 文 王志伟 李 磊

郭小东 王大鹏 李振平 刘朝峰

王晓奇

本书主审

张靖岩

## 内容提要

本书着眼于城市区域这一特定的承灾体,针对风险程度高、灾害后果严重的地震、火灾、洪灾等典型灾害,向读者介绍灾害防御相关理论、方法和技术。全书遵循评估、规划、处置的灾害应对逻辑,围绕工程防灾、规划防灾和管理防灾三个方面,首先阐述了城市区域灾害风险评估的理论与方法,并在此基础上介绍了单灾种专项防灾规划和综合防灾减灾规划的内容,最后从灾害监测预警、应急处置、信息化技术应用和韧性提升等方面提出防灾对策。本书内容基于团队多年来的研究成果,体现了城市防灾多灾种、多手段、全过程的特点,可为本行业领域和相关专业的工程技术人员、科研人员、管理人员、高校师生提供借鉴和参考。

# 丛书序

我国城市建设正处于规模扩大、建设提速的阶段,与此同时人口的高度集中、资源依赖的加重、城市系统的日趋庞大和复杂也带来了一系列社会问题。城市发生灾害的潜在风险日益加大,城市综合防灾能力建设面临着严峻的考验。如何加强主动防御能力,应对灾害威胁,减轻灾害影响,保障人民生命财产安全,维护城市功能的正常运行,是防灾减灾领域面临的新挑战。

中国建筑科学研究院有限公司多年来致力于地震、火灾、风灾等典型灾害的防御研究,解决建筑工程和城乡防灾中的关键技术问题;紧密围绕防灾科技发展战略需求,着力提高创新能力,增强核心竞争力,保持在全国建筑防灾减灾领域的领先地位;在国家科技支撑项目、863 项目、973 项目、国家自然科学基金项目、科研院所科技开发专项和标准规范项目、实验室建设等方面开展了一系列卓有成效的工作,成果斐然。

本丛书依托中国建筑科学研究院有限公司和合作单位的相关科研成果与推广应用经验,在持续性的科研成果积累基础上,以灾害管理和综合防灾理念为指引,对多年来的科研成果进行凝练和提升,强调新技术应用和新思路的探索。在防灾性能化设计、规划指引、决策分析、新技术应用等方面进行了深入、全面的阐述,提出了最新的灾害防御理论。许多研究成果已成功应用于我国防灾减灾建设实践,综合提升城市建设的防灾减灾能力。

本丛书将城市建设灾害防御中的技术问题进行广度和深度要求的有机结合,提出新对策,贯彻新理念,分享先进的防灾技术,可供专业技术人员参考。

本丛书分为《建筑工程灾害防御理论与技术》《城市区域灾害防御理论与技术》《城市建设灾害防御技术应用》三个分册,从不同维度阐述了工程建设和城市建设综合防灾相关研究成果和技术的应用。

《建筑工程灾害防御理论与技术》主要介绍单体建筑防灾技术,包括建筑防火、抗风、抗震和地基基础防灾等多个方面,针对不同灾害的作用特点提出不同灾种下的防灾性能设计方法,并应用数字化分析手段进行模拟、仿真和计算,提高分析精度和效率,助力防灾性能化设计目标的实现。

《城市区域灾害防御理论与技术》主要介绍区域防灾技术,从确保城市长期、可持续发展角度针对火灾、洪灾和地震灾害等,开展城市灾害风险评估,并在此基础上编制城市防灾规划;从灾害监测预警、应急处置和韧性提升等方面提出防灾对策;应用信息化技术进

行系统研发,提升灾害管理的整体水平和防灾应急效率。

《城市建设灾害防御技术应用》主要介绍工程应用案例,包括单体建筑和区域防灾相关实施案例的展示。

本丛书内容覆盖了城市建设面临的典型灾害防御关键技术,以深入、全面的研究成果为支撑,全方位构建城市建设综合防灾技术体系,将为持续加强城市综合防灾、减灾、抗灾、救灾能力,提升我国城市安全发展水平提供有力支撑。

城市综合防灾的核心价值就是进行灾害的关联升级研究。关联研究就是通过寻找事物间的关联点,探索关联间的互助与抵消的规律,将互利的部分整合与提升,实现最好的社会互补与时效。

建筑记录着人类发展的历史,推动着社会走向更美好的未来。城市应在综合防灾科学的基础上,通过现代科学技术去最终实现人与自然的和谐。

李引擎

# 前 言

城市是人类聚居的主要生活区域。随着社会经济的发展,城市迅猛扩张,人口和财富在城市的集中度越来越高,城市已经成为一个庞大、复杂、脆弱的巨大系统,面临的灾害风险也愈加严峻。提升城市应对各类自然和人为灾害、突发事件的能力,是保障城市正常发展和运维的重要举措。

城市区域的防灾主要包括两个层面:一是为应对自然灾害与人为灾害、原生灾害与次生灾害,要全面规划,制定对策;二是针对灾害发生前、发生时、发生后的各项防灾、减灾、避灾、救灾等情况,采取配套措施。城市防灾具有多灾种、多手段、全过程的特点,既要应对单一灾种的影响,也要考虑各灾种之间的关联性和相互作用,要从城市规划学科的角度统筹协调,将工程防灾、规划防灾和管理防灾三种手段综合应用,从灾前、灾中、灾后整个过程来加强管理,解决城市防灾面临的问题。

本书针对城市中风险程度高、灾害后果严重的几种典型灾害,基于多年来的研究成果,组织城市防灾领域的专家编写了《城市区域灾害防御理论与技术》一书。

本书的主要内容和编写工作安排如下:

第1章城市区域灾害风险评估,由朱立新、孙旋、李娜、王静、张念强、于文、王志伟执笔。以地震灾害、风灾、洪水灾害等典型灾害为主,针对各类灾害的作用机理和特点,基于相关研究成果和应用经验,提出城市区域各类典型灾害的风险评估方法,为确定城市防灾薄弱环节、制定有效的减灾策略提供依据。

第2章单灾种专项防灾规划,由李磊、于文、王晓奇执笔。本章主要针对火灾和地震灾害,阐述了城市消防规划和抗震防灾规划的编制要求和主要技术内容,可为城市专项防灾规划的编制和实施提供参考。

第3章城市综合防灾减灾规划,由郭小东执笔。本章对国内外城市综合防灾的发展历程进行了回顾,通过对国内外城市综合防灾案例的剖析,确定城市综合防灾的规划范畴与规划体系,提出规划理论和技术方法,并搭建综合防灾规划的基本框架,为规划的编制提供了理论依据和参考。

第4章城市综合防灾减灾对策,由郭小东、王大鹏、李振平、刘朝峰执笔。本章面向自然灾害频发、城市防灾减灾能力不足、缺乏综合防灾管理、政府对城市防灾的资金投入长期不足等现状,提出城市综合防灾减灾的基本对策和管理思路,并对现代化信息技术在应

急处置、科学决策方面的应用进行了探索和应用。在灾害防御中引入韧性城市理念,结合国内外韧性城市建设实践提出城市安全韧性的提升措施,并对国内外先进的防灾减灾策略进行了总结。

本书读者对象为具有一定相关知识背景政府防灾部门管理人员、工程建设技术人员、科研工作者和高校师生等。

本书为“城市建设灾害防御理论与技术应用丛书”之一,在编写过程中得到中国建筑科学研究院有限公司、住房和城乡建设部防灾研究中心、北京工业大学、应急管理部通信信息中心、河北工业大学等单位的大力支持,在此表示诚挚的谢意。由于编者水平有限,书中难免会有一些疏漏及不当之处,敬请广大读者提出宝贵意见。

本书编委会  
2023年10月

# 目 录

第 1 章 城市区域灾害风险评估	►001
1.1 城市区域地震风险评估 / 001	
1.1.1 地震危险性分析与地震动分析 / 001	
1.1.2 城市建筑工程震害预测 / 012	
1.1.3 城市生命线工程地震灾害评估 / 019	
1.2 城市区域火灾风险评估 / 045	
1.2.1 评估目的 / 045	
1.2.2 评估原则 / 045	
1.2.3 评估内容 / 046	
1.2.4 评估范围 / 046	
1.2.5 评估抽样 / 047	
1.2.6 评估方法 / 054	
1.2.7 评估示例 / 060	
1.3 城市区域洪水灾害评估 / 073	
1.3.1 国内外研究现状 / 073	
1.3.2 模型总体结构 / 075	
1.3.3 洪水演进模型 / 076	
1.3.4 内涝分析模型 / 080	
1.3.5 城市立体空间水流分析模型 / 082	
1.3.6 动态模拟技术 / 094	
第 2 章 单灾种专项防灾规划	►102
2.1 城市消防规划 / 102	
2.1.1 消防规划概述 / 102	
2.1.2 消防规划与城市总体规划和各专项规划的关系 / 104	
2.1.3 消防规划的编制过程和内容 / 105	
2.1.4 消防规划的实施和保障 / 107	

- 2.1.5 消防专项规划工作的薄弱环节 / 108
- 2.1.6 消防规划工作展望 / 109
- 2.2 城市抗震防灾规划 / 109
  - 2.2.1 城市抗震防灾规划基本要求和内容框架 / 110
  - 2.2.2 城市用地抗震性能评价 / 112
  - 2.2.3 生命线系统抗震防灾规划 / 113
  - 2.2.4 城市建筑抗震防灾规划 / 116
  - 2.2.5 城市地震次生灾害防御规划 / 117
  - 2.2.6 避震疏散规划 / 119
  - 2.2.7 信息管理系统 / 121

### 第3章 城市综合防灾减灾规划

▶ 133

- 3.1 国内外城市综合防灾发展历程及现状 / 133
  - 3.1.1 国内外城市综合防灾发展历程 / 133
  - 3.1.2 国内外城市综合防灾规划现状 / 136
- 3.2 国外城市综合防灾规划案例剖析 / 138
  - 3.2.1 美国 / 138
  - 3.2.2 日本 / 147
- 3.3 城市综合防灾的规划范畴与规划体系 / 158
  - 3.3.1 灾害预防规划体系 / 159
  - 3.3.2 灾害应急规划体系 / 160
  - 3.3.3 灾后重建规划体系 / 161
- 3.4 城市综合防灾规划与其他防灾规划的关系 / 162
  - 3.4.1 编制综合防灾规划的必要性 / 162
  - 3.4.2 城市综合防灾规划与城市总体规划的融合 / 162
  - 3.4.3 城市综合防灾规划与城市总体规划的关系 / 163
  - 3.4.4 城市综合防灾规划与单项防灾规划的关系 / 163
- 3.5 城市综合防灾规划的相关理论与技术 / 164
  - 3.5.1 城市灾害风险与防灾能力评估 / 164
  - 3.5.2 城市综合防灾规划的技术手段 / 165
- 3.6 城市综合防灾规划的基本框架 / 165
  - 3.6.1 宏观层面 / 166
  - 3.6.2 中观层面 / 167
  - 3.6.3 微观层面 / 168
- 3.7 《城市综合防灾规划标准》(GB/T 51327—2018)的主要内容 / 168

3.7.1	基本规定 / 169	
3.7.2	综合防灾评估 / 170	
3.7.3	城市防灾安全布局 / 171	
3.7.4	应急保障基础设施 / 172	
3.7.5	应急服务设施 / 172	
<b>第 4 章</b>	<b>城市综合防灾减灾对策</b>	<b>▶174</b>
4.1	国内外防灾减灾策略 / 174	
4.1.1	国外防灾减灾策略 / 174	
4.1.2	国内防灾减灾策略 / 177	
4.2	城市防灾的基本对策 / 179	
4.2.1	灾前防御与预警 / 179	
4.2.2	灾时应急与处置 / 181	
4.2.3	灾后恢复与重建 / 183	
4.3	信息化技术在城市防灾中的应用 / 186	
4.3.1	基于 GIS 的城镇灾害应急救援系统 / 186	
4.3.2	城镇典型突发事件趋势分析与应急决策支持系统 / 202	
4.3.3	城镇突发事件趋势分析与应急决策支持系统 / 211	
4.4	韧性城市理论与实践 / 217	
4.4.1	“韧性”的概念 / 218	
4.4.2	韧性城市的内涵 / 218	
4.4.3	韧性城市的特征 / 220	
4.4.4	韧性城市理论 / 221	
4.4.5	韧性城市的评估方法与原则 / 222	
4.4.6	国内外韧性城市的建设实践 / 224	
4.4.7	提高城市韧性的措施 / 226	
4.5	山地城市综合防灾对策 / 227	
4.5.1	加强山地城市综合防灾的理论基础研究 / 227	
4.5.2	完善山地城市综合防灾规划编制体系 / 227	
4.5.3	加强山地城市综合防灾的法规与规范建设 / 228	
4.5.4	创新山地城市综合防灾的技术方法 / 228	
4.5.5	探索山地城市综合防灾管理实施新机制 / 229	
	<b>参考文献</b>	<b>▶230</b>

## 1.1 城市区域地震风险评估

地震风险评估是基于概率风险分析的方法对地震可能造成的影响进行评估的一项技术。在 20 世纪 80 年代末,中国建筑科学研究院工程抗震研究所负责完成了建设部科学技术局支持的重点科研项目——“减轻城市地震灾害对策研究”,该项目的研究内容涵盖了城市防御地震灾害的多方面内容,为城市减灾工作的开展和进一步的研究工作打下了良好的基础,相关成果至今仍应用于城市抗震防灾中。

近年来,关于城市区域地震风险评估的研究一直在持续深入,在城市地震危险性分析、各类建筑震害预测方法、城市生命线工程震害评估、灾害损失和人员伤亡预测、次生灾害防御、城市抗震防灾规划编制以及地震灾害与实施地震保险的可行性研究等方面取得了一系列成果,并在实践中加以应用。

随着城市区域地震风险评估的研究日益拓展,在进行直接震害和损失评估的基础上,逐步向灾害风险管理转化,将城市视作有机整体,从其基本构成单元(社区、居住区等)出发,注重灾害管理过程中人和社会的主观能动性的作用,以降低灾害风险为目标,研究更为全面的评估方法,从而为提升城市综合抗震防灾能力提供有效依据。

### 1.1.1 地震危险性分析与地震动分析

地震危险性分析考虑的是城市 150~200 km 范围的地震地质环境及地震对城市可能产生的影响,而地震动分析关注的是在给定的地震作用下城市本身的地质环境对地震作用的影响,两者在本质上是密切相关的。在 20 世纪 80 年代初期的研究和实践中就将两者的计算分析有机地结合为一个整体。

#### 1.1.1.1 地震危险性分析原理

所谓地震危险性分析,就是把地震的发生以及地震对某一场地产生的影响都看作是一种随机现象,采用概率的方法来估计场地未来给定年限内遭受各种水平地震作用可能性的大小。通常用地震烈度或地震动参数来表示其估计结果,以便在工程设计中合理地考虑地震对工程结构的作用。

地震的发生在时间轴上的不平稳性和空间上的非均匀性是这一随机现象的特点。然而,在地震危险性的分析中,通常假设在一个潜在震源区内地震的出现是等概率的。地震的发生在空间分布的不均匀性只是通过潜在震源区的划分和采用不同的地震活动性参数来表示。对于地震在时间轴上的非平稳性,目前在工程上通过地震发生的速率的取值来予以考虑,广泛使用的仍然是平稳的泊松模型,该模型假定事件的出现是独立的,与过去的事件无关。本书接下来的分析中采用的模型即为泊松模型。

为了划分潜在震源区,需要对场址 100~200 km 范围内的地震地质环境及地震活动性进行评价,对本区域的主地震带的地震活动性进行统计分析,在评价的基础上划分出可能发生地震的区域,并给出相应的地震活动性参数,包括最大震级、 $b$  值和地震年平均发生率等。

为了考虑潜在震源区各个部位可能出现的地震事件对场址的影响,需要将每个潜在震源区划分为很多子源,然后逐个子源来考虑在各个子源中可能出现的事件对场地的作用。现在考虑一个子源  $i$ , 设它与要研究场地的距离为  $r$ , 在子源  $i$  中出现地震震级为  $m_j$

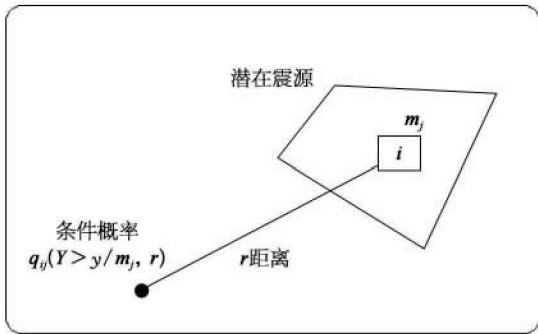


图 1-1 地震危险性分析基本原理

的事件,在场地将引起某个大小的地震动效应  $Y$  (如地震烈度、地面加速度或各种谱值等)。  $Y$  值由地震烈度或地震动衰减关系求出。因为它的不确定性,所以需要用概率密度函数来描述。如果该函数已知,则可估计在子源  $i$  中出现地震震级为  $m_j$  事件时在场地出现  $Y$  值的地震动效应的可能性大小。这可以用  $Y$  值大于某个给定值  $y$  的条件概率  $q_{ij}(Y > y/m_j, r)$  来表示,如图 1-1 所示。

因为假设地震的发生服从泊松分布,所以可认为每次地震的发生是独立事件。根据二项分布定理可以得到  $K$  次事件至少有一次事件在场地所引起的地震动效应  $Y$  超过  $y$  值的概率为

$$1 - (1 - q_{ij})^k \quad (1-1)$$

如果在子源  $i$  中出现震级  $m_j$  事件的年平均次数为  $V_{ij}$ , 则根据泊松分布可以得到  $K$  次震级  $m_j$  事件的概率为

$$\frac{e^{-V_{ij}} V_{ij}^k}{K!} \quad (1-2)$$

由式(1-1)和式(1-2)可以得到,子源  $i$  出现事件  $j$  使场地的地震动强度  $Y$  超过  $y$  的年概率  $P_{ij,1}$  为

$$P_{ij,1}(Y > y/m_j, r) = \frac{\sum_{k=0}^{\infty} [1 - (1 - q_{ij})^k] e^{-V_{ij}} V_{ij}^k}{K!} = 1 - e^{-V_{ij} q_{ij}} \quad (1-3)$$

如果在子源中有  $J$  事件发生,但没有任何事件在场址引起的地震动强度超过  $y$  的年概率可以表示为

$$1 - P(Y > y)_1 = \prod_{i=1}^I \prod_{j=1}^J [1 - P_{ij,1}(Y > y/m_j, r)]$$

则得

$$\begin{aligned} P(Y > y)_1 &= 1 - \prod_{i=1}^I \prod_{j=1}^J [1 - P_{ij,1}(Y > y/m_j, r)] = 1 - \prod_{i=1}^I \prod_{j=1}^J [1 - (1 - e^{-V_{ij}q_{ij}})] \\ &= 1 - \prod_{i=1}^I \prod_{j=1}^J e^{-V_{ij}q_{ij}} = 1 - e^{-\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J V_{ij}q_{ij}} \end{aligned} \quad (1-4)$$

$t$  年的超越概率可以用下式来表示:

$$P(Y > y)_t = 1 - [1 - P(Y > y)_1]^t \quad (1-5)$$

式(1-4)或式(1-5)就是估计一个场址的地震动危险性概率公式。显然,为了完成以上计算需要确定公式中两个变量  $V_{ij}$  和  $q_{ij}$ 。

如前所述, $V_{ij}$  是子源  $i$  出现  $j$  事件的年平均发生次数。假设在一个震源区中,地震的出现是等概率分布的。因此如果是面源,其面积为  $A$ ,子源面积为  $A_i$ ,则得

$$V_{ij} = N(m_j)A_i/A \quad (1-6)$$

式中  $N(m_j)$ ——该震源区一年出现震级为  $m_j$  事件的期望次数,可以由前面所述的震级-频度关系求得。

同样,对于线源按下式求出  $V_{ij}$  :

$$V_{ij} = N(m_j)L_i/L \quad (1-7)$$

式中  $L$ ——线源的长度;

$L_i$ ——子源的长度;

$N(m_j)$ ——点源。

如果是以地震烈度估计地震的危险性,则需要地震烈度衰减规律。一般用下式来表示地震烈度  $I$  随震级  $M$  和震中距  $R$  的变化规律:

$$I = C_1 + C_2M - C_2 \ln R - C_2R + \epsilon \quad (1-8)$$

式中, $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  和  $C_4$  为回归系数。地震烈度  $I$  的衰减公式中的系数  $\epsilon$  通常认为是平均值为零,标准差为  $\sigma$  的正态分布随机变量。显然,在给定的  $\epsilon$  值范围内观测点数的多少与  $\epsilon$  大小有关,是  $\epsilon$  的函数,用  $N(\epsilon)$  表示。可以把不超过某个  $\epsilon_0$  值范围的数据点占总数据点  $N$  的比例作为地震动强度不超过某个给定值的概率,即

$$P_{ij}(Y < y/m_j, r) = \frac{1}{N} \int_{-\infty}^{\epsilon} N(\epsilon) d\epsilon \quad (1-9)$$

因为  $\epsilon$  服从正态分布, 所以得

$$P_{ij}(Y < y/m_j, r) = \int_{-\infty}^{\epsilon_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\epsilon^2/2\sigma^2} d\epsilon$$

那么对于所要求的  $q_{ij}$  显然是:

$$q_{ij} = 1 - P_{ij}(Y < y/m_j, r) = 1 - \int_{-\infty}^{\epsilon_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\epsilon^2/2\sigma^2} d\epsilon \quad (1-10)$$

当然, 如果变量  $\epsilon$  不是正态分布,  $q_{ij}$  的计算式就有别于式(1-8), 加速度和各种谱值也是一样, 为了求出  $q_{ij}$ , 需要知道相应的  $\epsilon$  分布。

至此, 只要求出每个子源  $i$  和所有事件  $J$  的  $V_{ij}$  和  $q_{ij}$  代入式(1-4) 和式(1-5)就可求得所有潜在震源对场址引起的地震动强度  $Y$  超过某个给定值  $y$  的概率。在本系统中, 为了得到基岩加速度谱, 所用的衰减规律为加速度反应谱, 如下式表示:

$$\log Y(M, R) = C_1 + C_2 M + C_3 M^2 + C_4 \log[R + R_0(M)] \quad (1-11)$$

其中,

$$R_0(M) = C_5 \exp(C_6 M) \quad (1-12)$$

式中  $Y$ ——地震动参数;

$C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$ 、 $C_6$ ——回归系数, 与周期有关。

为此需要逐个周期来计算其超越概率。图 1-2 表示了三个概率水平的露头基岩加速度谱。

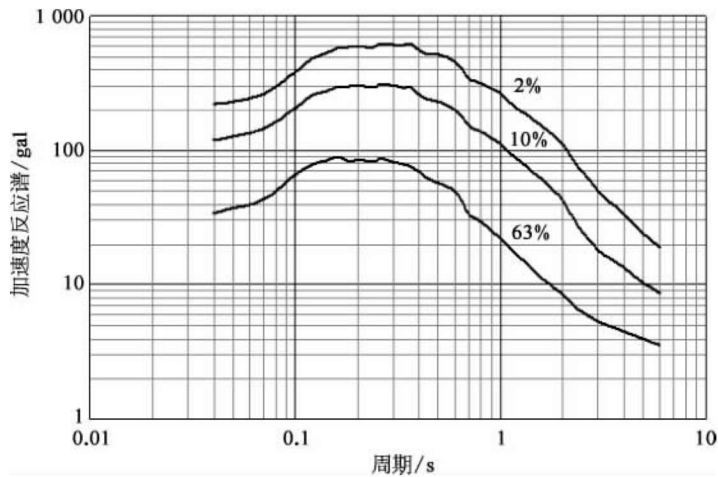


图 1-2 三个概率水平的基岩加速度谱

#### 1.1.1.2 人工合成基岩加速度时程

强震记录表明, 加速度时程无论在强度或频率域上都是非平稳的。然而, 早期广泛应

用的人造地震波是在白噪声的基础上人为地加上一个幅值包络线来反映幅值的非平稳性,并没有反映频率特性的非平稳性。1979年,Ohake指出相位差谱分布的特性后,许多研究者在合成地震波中采用了非均匀分布的相位角,从而在某种程度上改进了人工合成加速度时程的方法。另外一些研究者则引入了时变功率谱的概念,以便在强度和频率域模拟加速度时程的非平稳性。Kameda运用多重滤波技术计算强震加速度时变功率谱,用于合成加速度时程,并通过土层标准贯入锤击数或传递函数来考虑场地条件对时变功率谱的影响。参考文献[3]在此基础上给出了岩石场地时变功率谱模型,此外,在拟合地震动时还考虑了断层等的影响。

通常来说,场址地震动的频谱特性可用场址加速度谱来表示,因此可以用其加速度谱来改进岩石场地的时变功率谱模型,使其适用于给定设计谱的各种场地的非平稳加速度时程的合成。

类似于平稳过程,用下式合成非平稳的加速度时程  $x(t)$ :

$$x(t) = \sum_{k=1}^m \sqrt{4\pi G(t, 2\pi f_k) \Delta f} \cos(2\pi f_k t + \varphi_k) \quad (1-13)$$

式中  $f_k$ ——频率;

$\varphi_k$ ——相位角,在  $0 \sim 2\pi$  间均匀分布;

$\Delta f$ ——频率增量(Hz);

$G(t, 2\pi f_k)$ ——时变功率谱,对于给定的设计地震,它是时间和频率的函数。

Kameda对日本84个大震加速度记录,利用多重滤波技术计算功率谱,并进行统计分析得到它的表示式:

$$G_x(t, 2\pi f) = a_m^2(f) \left[ \frac{t - t_s(f)}{t_p(f)} \right]^2 \exp \left\{ 2 \left[ 1 - \frac{t - t_s(f)}{t_p(f)} \right] \right\}, t > t_s \quad (1-14)$$

式中  $t_s(f)$ ——起始时间;

$t_p(f)$ ——功率谱峰值的持时;

$a_m(f)$ ——功率谱峰值的方根,分别用下式表示:

$$\log a_m(f) = B_0(f) + B_1(f)M - B_2(f)\log(R) \quad (1-15)$$

$$\log t_p(f) = P_0(f) + P_1(f)M - P_2(f)\log(R) \quad (1-16)$$

$$t'_s(f) = t_s(f) - t_m = S_0(f) + S_1(f)R \quad (1-17)$$

式中  $M$ ——震级;

$R$ ——震中距(km);

$t_m$ ——在所考虑的频率范围内  $t_s$  的平均值,其他参数见参考文献[4]。

在实际工程中,经常是给定场址的设计加速度谱,并要求拟合的加速度时程谱特性与其一致。式(1-14)中的  $a_m^2$  是给定频率的时变功率谱最大值,与场地条件关系密切,其他