

The background of the cover is a collage of three black and white photographs showing the aftermath of an earthquake. The top photo shows a multi-story building with significant structural damage and exposed reinforcement. The middle photo shows a building that has partially collapsed, with debris visible. The bottom photo shows a large pile of rubble and twisted metal. The entire cover has a yellowish-gold tint.

苏幼坡 苏经宇 苏春生 刘瑞兴 等 著

城市生命线系统震后恢复 的基础理论与实践

地震出版社

城市生命线系统震后恢复的 基础理论与实践

苏幼坡 苏经宇 苏春生 刘瑞兴 等 著

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

城市生命线系统震后恢复的基础理论与实践/苏幼坡等著. —北京:地震出版社, 2002.3
ISBN 7-5028-1994-0

I. 城... II. 苏... III. 城市—生命线系统工程—震害—恢复 IV. TU984.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 082318 号

内 容 介 绍

大的城市地震灾害一般都会造成城市生命线系统的严重破坏。为了确保地震灾害发生后城市居民的基本生活条件和城市社会经济运营的基本机能,震后的一项重要任务是尽快恢复城市生命线系统。本书的主要内容是城市生命线系统震后恢复的基础理论与实践。以我国的唐山地震、日本的阪神地震和美国的北岭地震为主要研究对象,重点论述了城市生命线系统的地震震害、震害原因与震后恢复的实践;城市生命线系统抗震规划的编制与震后恢复战略的制定;城市生命线系统震后恢复过程的优化理论与实践等。本书对于城市管理人员、地震工作者、城市生命线地震工程研究人员和高等学校相关专业的师生有一定的参考价值。

城市生命线系统震后恢复的基础理论与实践

苏幼坡 苏经宇 苏春生 刘瑞兴 等 著

责任编辑:蒋乃芳

责任校对:王花芝

出版发行:地震出版社

北京民族学院南路9号

邮编:100081

发行部:68423031 68467993

传真:68423031

门市部:68467991

传真:68467972

总编室:68462709 68423029

传真:68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销:全国各地新华书店

印刷:北京地大彩印厂

版(印)次:2002年3月第一版 2002年3月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:304千字

印张:12

印数:0001~1000

书号:ISBN 7-5028-1994-0/TU·154 (2545)

定价:20.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

前 言

地震给人类带来的灾难居众灾之首。唐山地震等严重的城市地震灾害,不仅造成重大的人员伤亡和经济损失,而且使城市生命线系统也遭受严重破坏,在很大程度上降低、甚至丧失了城市居民的基本生活条件和城市社会经济运营的基本机能。地震灾害发生后必须有效地将城市生命线系统尽快恢复到震前的水平,并结合震后新城市的崛起不断完善、发展,以适应现代城市建设发展的需要。

本书是以城市生命线系统震后恢复为基本内容的专著,比较全面地论述了我国唐山地震、日本阪神地震和美国北岭地震中城市生命线系统的主要震害、震害产生的原因、震后恢复的基础理论与实践,包容了唐山地震以来有关震后恢复的许多重要研究成果、经验与教训。全书内容对于城市管理人员、地震工作者、城市生命线地震工程研究人员和高等学校相关专业的师生有一定的参考价值。

书中涉及国内外城市生命线系统震后恢复的许多重要研究领域,力求理论与实践相结合。第一章论述城市生命线系统的形成、发展、特点和功能,各种城市生命线系统之间震害的相互影响,城市生命线系统的减灾对策和现代高新技术在城市生命线系统震后恢复过程中的应用与效果等。第二章和第四章依据城市生命线系统震后大量的调查与研究报告,系统地分析了唐山地震、阪神地震、北岭地震的主要震害与震后恢复过程。第三章是城市生命线系统震害的重要原因及其分析。第五章主要探讨城市生命线系统抗震规划的编制与震后恢复战略的制定。第六章则侧重研究城市生命线系统震后恢复的优化理论与实践,主要包括优化理论、抗震诊断与可靠性评价理论、震后恢复的时序性与阶段性理论、地域区划理论与有序恢复理论等。

在本书编写之前,河北省重点实验室河北省地震工程研究中心主任苏幼坡教授提出了编写框架和大纲。第一章、第六章由苏幼坡教授执笔,第二章、第五章由苏经宇研究员和苏春生高级工程师执笔,第三章由刘瑞兴教授执笔,第四章由马亚杰、杨珺珺执笔。全书由苏幼坡教授定稿。赵亚敏、张静为本书的插图作了大量工作。

由于作者水平、知识面和文献量有限,书中疏漏难免,敬请批评指正。

河北省重点实验室河北省地震工程研究中心

2001年10月

目 录

第一章 总论	(1)
一、城市生命线及其研究概况	(1)
二、城市生命线地震工程的主要研究对象与研究体系	(3)
1. 研究对象	(3)
2. 研究体系	(4)
三、城市生命线系统的主要特点	(5)
1. 公共性和共享性	(5)
2. 网络性或系统性	(6)
3. 构造震害与机能震害	(7)
四、现代城市的主要特点与对城市生命线系统的依赖性	(8)
1. 现代城市的主要特点	(8)
2. 现代城市对城市生命线系统的高依赖性	(9)
3. 地震与特大城市动议 (EMI)	(10)
五、城市生命线系统的主要震害形式	(11)
1. 直接震害与间接震害	(11)
2. 主震震害、余震震害与次生震害	(12)
3. 不同种类城市生命线系统的具体震害形式	(12)
六、城市生命线系统恢复的时序性与阶段性	(13)
七、各种城市生命线系统震害的相互影响	(16)
1. 生命线系统之间的各种依存关系	(16)
2. 生命线系统之间的相互影响	(17)
3. 影响度与影响度序	(18)
八、城市生命线系统抗震诊断	(19)
1. 地下管路的抗震诊断	(19)
2. 电力系统的抗震诊断	(20)
3. 煤气系统的抗震诊断	(21)
4. 交通系统的抗震诊断	(22)
5. 给排水系统的抗震诊断	(23)
九、城市生命线系统的抗震减灾对策	(25)
1. 减轻物理震害	(26)
2. 系统的冗余与分割	(26)
3. 系统自动化	(26)
4. 对应与恢复	(27)
十、因特网上的地震情报网站及其搜索方法	(28)

1. 因特网上的主要地震情报网站与网址	(28)
2. 地震情报网站的网上搜索方法	(31)
十一、高新技术在城市生命线防震减灾中的应用	(32)
1. 城市地理信息系统 (UGIS)、信息地理系统 (GIS)	(32)
2. 城市生命线系统实时地震防灾系统	(34)
3. 航空和卫星监测系统	(35)
4. 地震灾害情报系统	(35)
第二章 城市生命线系统震害	(37)
一、唐山地震 (1976 年 7 月 28 日, $M 7.8$)	(37)
1. 电力系统	(37)
2. 煤气系统	(39)
3. 交通系统	(39)
4. 给排水系统	(43)
5. 通信系统	(45)
二、日本阪神地震 (1995 年 1 月 17 日, $M 7.2$)	(45)
1. 电力系统	(45)
2. 煤气系统	(45)
3. 交通系统	(46)
4. 给排水系统	(51)
5. 通信系统	(51)
三、美国北岭地震 (1994 年 1 月 17 日, $M 6.7$)	(52)
1. 电力系统	(52)
2. 煤气系统	(52)
3. 交通系统	(53)
4. 给排水系统	(54)
5. 通信系统	(54)
四、其它地震	(55)
1. 我国台湾省集集地震 (1999 年 9 月 21 日, $M 7.6$)	(55)
2. 日本关东地震 (1923 年 9 月 1 日, $M 8.2$)	(58)
3. 日本新潟地震 (1964 年 6 月 16 日, $M 7.5$)	(58)
4. 日本宫城县地震 (1978 年 6 月 12 日, $M 7.4$)	(59)
5. 日本福井地震 (1948 年 6 月 28 日, $M 7.1$)	(60)
6. 哥伦比亚金地奥 (Quindio) 地震 (1999 年 1 月 25 日, $M 6.2$)	(61)
7. 美国圣费尔南多地震 (1971 年 2 月 9 日, $M 6.6$)	(62)
8. 美国洛玛·普里埃塔地震 (1989 年 10 月 17 日, $M 7.1$)	(63)
9. 土耳其西北部地震 (又称科加伊里地震, 1999 年 8 月 17 日, $M 7.4$)	(63)
第三章 城市生命线系统震害原因分析	(64)
一、地震强度	(64)
二、场地的地质类型、地形、水文条件	(67)

三、场地液化	(71)
1. 主要地震灾害的场地液化	(71)
2. 场地液化与侧向流动、下沉	(74)
3. 防止场地液化的主要对策	(75)
四、管路类型与空间位置	(76)
五、滑坡	(77)
1. 地震滑坡灾害	(77)
2. 地震滑坡的主要类型	(78)
3. 地震滑坡的地质、地形、水文与气象条件	(79)
4. 地震震级与地震滑坡	(79)
5. 防治、减轻滑坡灾害的主要措施	(79)
第四章 震后恢复	(84)
一、唐山地震的震后恢复	(84)
1. 恢复规划	(84)
2. 抗震救灾组织的建立	(86)
3. 电力系统的震后恢复	(87)
4. 煤气系统的震后恢复与建设	(88)
5. 给水系统的震后恢复	(90)
6. 排水系统的震后恢复	(92)
7. 交通系统的震后恢复	(95)
8. 通信系统的震后恢复	(100)
二、阪神地震的震后恢复	(102)
1. 电力系统的震后恢复	(102)
2. 煤气系统的震后恢复	(105)
3. 交通系统的震后恢复	(108)
4. 给水系统的震后恢复	(114)
5. 排水系统的震后恢复	(116)
6. 通信系统的震后恢复	(121)
三、北岭地震的震后恢复	(123)
1. 电力系统的震后恢复	(123)
2. 煤气系统的震后恢复	(124)
3. 交通系统的震后恢复	(124)
4. 给排水系统的震后恢复	(126)
5. 通信系统的震后恢复	(127)
第五章 抗震防灾规划与震后恢复战略	(129)
一、制定生命线抗震防灾规划的主要依据与内容	(129)
1. 制定抗震防灾规划的主要依据	(129)
2. 城市生命线系统抗震防灾规划的主要内容	(132)
二、系统动力学预测模型及其在编制生命线系统抗震防灾规划中的应用	(136)

1. 系统动力学简介	(136)
2. 系统动力学预测模型	(137)
3. 恢复战略对恢复过程的影响	(140)
三、动态规划法及其在制定恢复战略中的应用	(141)
1. 动态规划法简介	(141)
2. 动态规划法应用简例	(143)
3. 用动态规划法制定城市煤气系统的恢复战略	(145)
第六章 震后恢复过程的优化	(148)
一、恢复曲线及其在震后恢复过程中的应用	(148)
1. 恢复曲线	(148)
2. 恢复过程优化的数学模型	(148)
3. 恢复过程优化的主要影响因素分析	(150)
4. 恢复地域单元数与恢复顺序	(151)
二、树枝结构干线网的震后恢复优化	(153)
1. 最大梯度法	(153)
2. Horn 算法	(153)
3. 两种算法恢复顺序的比较	(153)
三、配水管网的优化设计	(155)
1. 连接度	(156)
2. 优化设计模型	(157)
3. 模型的应用与效果	(159)
四、震害损伤在高架桥各构成要素上的优化分配	(161)
1. 损伤度评价曲线与初期投资额感度曲线	(163)
2. 各要素损伤分配的优化方法	(165)
五、城市生命线系统的优化分割	(166)
1. 连续性线状构筑物的震害位置分布	(167)
2. 连续性线状构筑物的期待连接长度	(168)
3. 实际分割时线状构筑物的期待连接长度	(168)
4. 期待连接长度最大化的优化分割	(170)
5. 计算示例分析	(171)
六、重要度与震后恢复过程优化	(175)
1. 重要度	(175)
2. 设施震害重要度	(175)
3. 机能震害重要度	(175)
4. 社会影响重要度	(177)
参考文献	(179)

第一章 总 论

一、城市生命线及其研究概况

地震工程学中的生命线,译自英文 Lifeline。

广义上说,生命线分布在各个地域,而集中在城市内的生命线称为城市生命线或城市生命线系统。城市生命线系统是确保城市居民生活条件,维持城市基本机能的网络状公共工程,主要包括城市的电力、煤气、给排水、交通、通信、热力等系统。由于现代城市中人口、高层建筑、财富、生产与各种灾害高度集中,研究城市生命线系统抗震减灾有更为重要的理论与实用意义。

生命线与生命线地震工程是 20 世纪 70 年代中期提出的。1971 年 2 月 9 日,美国发生了圣费尔南多地震,加利福尼亚大学的 Duke.C.M 教授考察了灾区的电力、煤气、给排水、交通和通信等系统后,提出了生命线(Lifeline)和生命线地震工程(Lifeline Earthquake Engineering)的概念。1975 年,在美国召开的地震工程国际会议上,他发表了题为《生命线地震工程评价指南》(Guidelines for Evaluation of Lifeline Earthquake Engineering)的学术论文。1973 年美国商业部编辑出版了有关圣费尔南多地震的研究报告书,在其索引中尚无“Lifeline”。1974 年美国土木工程学会设立了生命线地震工程技术委员会(Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, TCLEE),这是世界上第一个关于生命线地震工程的学术性组织。1995 年该委员会出版了专著《Northridge Earthquake Lifeline Performance and Post-Earthquake Respons》(Anshel, 1995),比较详细地介绍了美国北岭地震的震害特性与震后恢复。

日本是严重地震灾害的多发国,而且全国半数以上的人口集中在城市,近年来一直重视城市生命线的研究与实践工作,多次召开以生命线为主要议题的国际会议,取得了数量众多、学术水平较高的研究成果,1991、1998 年编辑出版了《生命线地震工程》(高田至郎,1991)、《地震与城市生命线——系统的诊断与恢复》(城市防灾与环境研究会,1998)等专著。特别是阪神地震(又称兵库县南部地震)后,无论在理论上还是实践上都进行了深入的研究,取得了许多重要的研究成果。日文《土木学会论文集》、《自然灾害科学》、《防灾系统》等刊物中较全面地总结了生命线系统震害与震后恢复的经验与教训。

我国的城市生命线系统抗震减灾研究工作,得到国外同行专家的客观评价。高田至郎(1991)在他编著的《生命线地震工程》一书中指出,纵观世界各国的生命线地震工程研究,1976 年唐山地震时生命线设施受到严重破坏的中国,从数年前开始,研究活动日趋活跃。我国和美国、日本是世界上研究生命线地震工程比较活跃的国家。

1966 年 3 月 8 日和 22 日,河北省邢台地区先后发生 $M_{6.5}$ 、 $M_{7.2}$ 两次强烈地震。周恩来总理莅临视察并作了重要指示:“地震工作要保卫大城市、大水库、电力枢纽、铁路干线做

出贡献。”遵照周恩来总理的指示，邢台地震后，国家有关部门派出 1000 多人去地震灾区现场考察，调查研究，总结经验。1976 年 7 月 28 日发生了唐山大地震，唐山市区的城市生命线系统几乎完全瘫痪，天津市的城市生命线系统也受到不同程度的破坏。我国广大地震工作者和电力、煤气、市政工程、交通、通信等专业的科研、工程技术人员和有关领导亲临地震灾区抗震救灾第一线，对唐山灾区（包括天津市、北京市）的城市生命线系统进行了广泛、深入的考察，取得了极为宝贵的研究成果（刘恢先，1986）。可以认为，我国对城市生命线系统的系统性研究始于唐山地震，唐山地震以后，我国成为世界上城市生命线系统研究较为活跃的国家之一。

唐山地震发生后，北京电力设计院、水利电力部西北电力设计院、北京市市政设计院、天津煤气热力设计所、天津市市政工程设计院、天津市市政工程局、天津大学、铁道部第一勘探设计院、铁道部大桥工程局、交通部公路规划设计院、交通部公路科学研究院、交通部第一公路工程局、交通部第一航运工程局、交通部水运规划设计院、国家地震局工程力学研究所、华北电力管理局、河北省交通规划设计院、河北省邮电局、辽宁省交通科学研究所、唐山地区交通局、唐山市城建局等单位派员对地震地域的电力、煤气（天津市）、给排水、交通（铁路、公路、桥梁、河海码头）、通信诸系统的震害与震后恢复进行了全面的科学考察。仅刘恢先主编的《唐山大地震震害》一书就收入关于生命线系统的现场考察报告 50 余篇，考察内容之全面，考察范围之广泛，考察成果之丰硕，在我国地震史上是前所未有的，在世界地震史上也是少见的。

我国地震社会学工作者，还从社会学、灾害社会学和地震文化学的角度，调研了城市生命线震害及其对社会的影响。在王子平（1998）著的《灾害社会学》、陶如谦和王子平（1996）主编的《河北省震灾社会调查》、邹其嘉和王子平等（1997）主编的《唐山地震灾区社会恢复与社会问题研究》等专著中，都依据调研成果，精辟地剖析了城市生命线震害对震后居民的心理、需求、行为的影响及相应的对策，提出了这些学科的理论框架、基础理论、研究对象、研究方法、学科体系与发展方向以及学科的社会实用性。为我国灾害社会学、地震社会学、地震文化学的形成与发展做出了贡献。

20 世纪 90 年代是我国生命线地震工程研究的重要发展时期，国家地震局工程力学研究所成立了生命线研究室，赵成刚等（1994）著的《生命线地震工程》出版发行。众所周知，一个研究领域创建学术性研究机构和有专著问世，是这个研究领域的科学研究取得长足进展或日趋成熟的重要标志。这意味着，在该研究领域内已有专业人员有组织地开展科学研究工作，研究成果的积累量比较多，基本形成了科学研究的理论框架，有相对确定的研究对象、研究方法和实用方向等，有了一定数量的学科专家群，对推动科学研究工作的发展有不容忽视的作用。

据 1991~2000 年《中国地震科研课题总览》的统计，我国已经完成的高层次的城市生命线系统科学研究成果有几十项，仅 1998 年就完成了《生命线工程系统震害损失快速评估及计算机软件研制》、《生命线工程系统震害预测方法研究》、《北京市重大、重点、生命线工程地震安全情况调查与研究》、《管路工程抗震设防标准研究》、《城市立交桥抗震安全性评价方法》、《交通工程抗震设防标准的编制》、《通讯枢纽工程抗震设计技术》、《电厂地震可靠性分析方法与包头市地震震害调查与研究》、《网络工程抗震性能分析技术》、《城市交通系统震害预测研究》、《北京市西直门、三元桥立交桥震害预测》等科学研究项目。我国城市生命线系统的

科学研究工作,已经深入到许多重要研究领域,研究课题紧密结合我国的国情和地域特征,突出创新性、理论性、实用性和学术性,为解决城市生命线系统的重要理论与实用问题提供科学依据。

城市生命线系统科学研究工作的不断深入发展,促进了该领域的国际间学术交流活动。1976年美、日两国在东京召开了以城市生命线系统为重点研讨内容的地震工程研究学术会议。此后,美国土木工程学会和美国机械学会每隔一二年举办一次生命线地震工程领域的国际会议。1998年我国在昆明市首次召开了生命线地震工程国际会议。

二、城市生命线地震工程的主要研究对象与研究体系

1. 研究对象

表1-1中比较了①《生命线地震工程》(赵成刚等,1994),②《生命线地震工程》(高田至郎,1991),③《地震与城市生命线——系统的诊断与恢复》(城市防灾与环境研究会,1998),④《Northridge Earthquake Lifeline Performance and Post-earthquake Response》(Anshel,1995)和⑤《地震词典》(周存忠,1991)5种专著界定的研究对象。

由表1-1可以看出,在生命线地震工程研究对象的界定上,5种专著有共识,也有分歧,但都把能源系统、通信系统、交通系统、给排水系统作为研究对象。其中:能源系统主要包括电力和煤气系统;电力系统由发电、变电、输电和配电设施和线路构成;城市煤气系统按煤气来源有人工煤气系统与天然煤气系统;人工煤气系统主要由生产设施、存储与输送设备(含检测仪表)以及管线等构成。通信系统由有线、无线设施与线路构成的电信网络系统。交通系统研究的主要是公路与铁路(包括桥梁、隧道)、飞机场、港口等。给排水系统由给水系统与排水系统构成。

界定生命线地震工程的研究对象时,一般都着眼于网络性或系统性、公共性与机能性。而网络性与系统性是城市生命线系统最重要的属性,是界定研究对象的最重要依据。城市的医院、仓库、煤矿矿井和各种交通工具,没有或少有网络性与系统性,或不是震害研究的主要内容,故不作为本书的研究对象。

应当指出,随着城市的进步与日趋现代化,城市生命线系统呈动态发展态势,因此生命线地震工程的研究对象也随时间推移而变化。近些年来,大城市出现了以高架桥与立交桥为支承物的快车道、城市轻轨铁路,许多城市兴建或者扩建地下铁路,成为城市交通系统的重要组成部分;大量局域网,特别是国家骨干网和因特网的出现与蓬勃发展,已经并将继续改变通信系统的构成;唐山大地震时,唐山市没有煤气管网,地震后崛起的新唐山已经拥有几十万个煤气用户,煤气管网遍及主要市区,成为研究唐山市生命线系统的重要内容;随着电厂余热利用的普及,一些城市形成了相当庞大的热力管网,它具有城市生命线的网络性或系统性、公共性与机能性,已经是城市生命线地震工程研究不容忽视的内容之一。此外,许多城市特别是南方的城市,水路运输十分发达,市区内有错综复杂的水路运输网,也是城市生命线地震工程的重要研究对象。

本书的主要研究对象是城市的电力系统、煤气系统、通信系统、交通系统、热力系统等

的震害与震后恢复。研究我国唐山地震和台湾省集集地震、日本阪神地震、美国北岭地震等

大的地震灾害造成的城市生命线系统震害状况、震害规律、震害机理、震害理论以及震害的诊断与震害预测；城市生命线系统震后恢复的经验与教训，恢复的战略与方针，恢复的决策、组织与具体实施方法，恢复过程的优化；现代高新技术在城市生命线系统建设与震后恢复过程中的应用与效果，并分别探讨各个系统的震害与震后恢复。

表 1-1 城市生命线系统的研究对象比较表

研究者 系统	①	②	③	④	⑤
能源	供电系统（发电厂、传送系统、终端系统、配置系统）和天然气系统（传送系统、储气系统、配置系统）	电力、煤气、石油设施	发电、变电、输电和配电设备；控制用的通信与情报系统；煤气制造、储存设备与管路、仪表等	发电、变电、输电和配电设备；控制用的通信与情报系统；煤气制造、储存设备与管路、仪表等	能源的生产、储备、传递系统（煤矿矿井、采油、炼油、储油、输油管道、发电厂、变电站、高压输电线等）
通信	无线电、电视和电话	电话、电报、收音机、电视、邮电	有线传输线路设备、管路、电信网络系统	电话、国营与私营网络、无线电广播与电视	有线电发射台、电台、电报和电话设备等
交通	公路、快车道、铁路、机场和港口设施	公路（隧道、桥梁）、铁路、机场、港湾	公路、铁路（隧道、桥梁）、地铁	公路、桥梁、铁路、港口、飞机场	公路、铁路、桥梁、车站、车辆、港口、船舶、机场的候机室和跑道等
给排水	给水系统（储水池、消防、处理设备和配置系统）和污水系统（收集系统、处理设备）	给排水、河流、坝	给排水	给排水	
（卫生）					医院、水库、水塔、给排水、废品及垃圾处理厂等
（物资储备）					仓库，特别是危险品仓库

2. 研究体系

从过去的震害实践判断，生命线地震震害的主要原因是强烈的地震动、场地的永久变形、

场地液化以及由此引起的侧向流动等。而且地震灾害发生后，不仅仅造成设施的构造破坏，也降低甚至丧失供给机能，同时产生灾害的波及。综合多年的研究成果可知，生命线地震工程的研究体系基本形成，可以用图 1-1 描述（高田至郎，2000）。

研究体系的核心是城市生命线系统地震震害，包括以下 4 方面内容：①物理震害分析：以城市生命线设施构造的直接破坏为研究对象，通过观测、实验与理论解析，阐明地震外力与生命线设施的响应，完善抗震设计方法，提出抗震对策；②机能丧失分析：从震后城市生命线系统服务质量降低或供给机能完全丧失的角度，掌握震害状况，采取紧急对应措施，分析恢复过程，研究系统的可靠度和防灾对策；③震害波及分析：基于地震情报学、地震社会学、灾害经济学和灾害管理学的基础理论，研究地震灾害的时空影响等；④物理震害、机能丧失、震害波及之间的相互关系：例如丧失机能分析的系统可靠性不仅取决于紧急对策、震害状况的把握和恢复过程的分析，还受物理震害的抗震设计方法、灾害波及的生命线风险管理等的影响，而且影响关系既错综复杂，又有一定的规律。确定研究体系的目的是提高城市防灾空间生命线系统的可靠性。

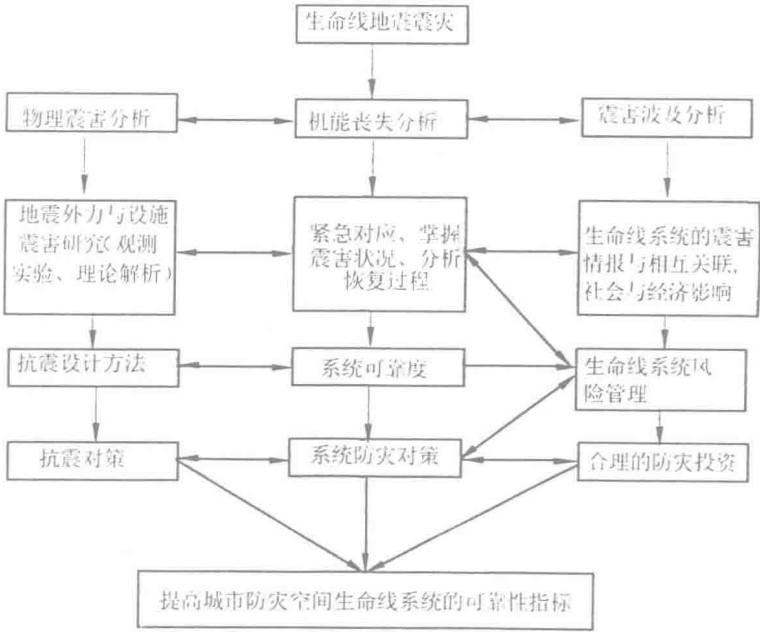


图 1-1 城市生命线系统的研究体系示意

三、城市生命线系统的主要特点

1. 公共性和共享性

城市生命线系统是确保城市居民生活条件、维持城市基本机能的网络状公共工程设施，具有很高的公共性和共享性。体现这些特性的主要标志是：城市生命线系统的服务范围广，

服务地域覆盖整个城市；服务的人口多，一个系统的服务对象少则几十万、几百万，多则上千万；服务的经济效益、社会效益大；居民和城市对城市生命线系统的依赖性大。因此，城市生命线系统一旦遭受震害，因服务质量降低或丧失机能，将造成严重灾害，城市生命线系统的公共性和共享性明显减弱甚至完全消失，居民生活的“贫困度”（缺乏基本生活条件的程度）明显增加，在特大地震灾害发生的短期内有可能完全丧失最基本的生存条件；城市的基本机能也将大幅度降低，震后的一段时间内，震区的社会经济发展受到严重影响。这是因为城市生命线系统传递的是国计民生不可或缺的物质与情报。电力系统、煤气系统、给水系统利用地上或地下的管路或线路，向所有的用户提供必需的电、（煤）气、水；通信系统通过有线或无线系统为各类用户提供电话、电报、传真以及网络情报服务等，随着网络技术、计算机技术等高新技术的蓬勃发展和网民的快速增加，网络情报服务的地位与作用将越来越大；交通系统则提供高速、安全、舒适的交通环境与条件，满足居民与城市经济发展的交通需求，并建立起与其它地域广泛联系的综合性交通体系；排水系统把城市的污水、雨水等排入污水处理厂，处理达标后排入江河或循环利用。显然，公共性与共享性使城市生命线系统与每一位居民、每一个单位和城市的每一项经济社会活动形成了极为密切的关系。城市生命线的供量保障、完善程度、质量高低、机能强弱、服务优劣，对城市的居民生活以及经济发展有重大影响。重视城市生命线系统的建设与发展，功在当代，利在千秋，利国利民。

2. 网络性或系统性

城市生命线系统不是指单个的构筑物，而是系统所有设施的集合。而这些设施的集合形成网络或系统。研究一座城市的交通图可发现，一条街道是一条线，而众多的街道则构成网目密集的市内交通网络。把视图的视野逐步向郊区扩展，网目的密集度降低，而且市内的交通网与市外的公路网相连通，形成更大的交通网络。比较多个城市，特别是大中型城市的交通系统也不难发现，每一座城市都有各自特色的由街道、快车道、公路（含高速公路）、地铁、城市轻轨铁路或有轨电车路甚至水路构成的交通网络，而且与市外的交通网络相连接，把一个城市交通网络的机能融会于更大的交通网络机能之中。因此，城市交通系统的研究视野，一般都由发生震害的城市扩展到城市以外的交通震害地区。

无论平时还是发生地震灾害后，城市交通网络都有重要意义。由于形成网络，即使某些路段或网目完全失去机能，也不至于造成大范围的交通中断，可以避开交通堵塞的路段或网目，沿其它网目迂回前进，仍可达到运行的目的地。

不同种类的城市生命线系统又有互异性。城市电力、煤气和给水诸系统，通过线路或管路网络单向性地把电、（煤）气、水输送给用户，在正常运行情况下，输送的物质没有逆行性和互混性。而通信网络、交通网络的物质输送方向则具有多向性。例如，电话用户可以通过本市的、全国的、国际的电话网络，接通各地的任何具体用户的电话，而且语言或图像的传递可以是双向的或多向的。城市交通网络特别是现代化程度高的大城市的交通网络，物质输送方向更为复杂，各种交通工具，为了各种目的，把物质运送到城市的各个需求点，或把物质输送到城市以外的广阔地域。因此发生地震时，通信网络、交通网络受害的影响往往直接波及城市以外甚至非灾区。由于城市的电力网络一般是更大电网的子网，例如，唐山市的电力网络是京津唐电网的一个组成部分。所以，城市电力网络遭受震害后，也影响更大电网的电力供求。震后恢复建设时，应当考虑这些城市生命线系统的震害有更大的空间波及性和震

后恢复的后援能力。

有些城市生命线系统有清晰的层次性。电力网络有高压电、低压电；城市煤气网络有高压煤气、中压煤气和低压煤气；交通网有干线与支线；给水系统或热力系统的水压也有高低之分。这种层次性决定了网络中物质传递的顺序性和在网络中不同层次的设施作用的差异性以及设施震害分布的不均匀性。煤气网络的压力层次如图 1-2 所示。煤气制造工厂生产的高压煤气经高压煤气调压阀进入中压管网，供给部分厂矿作能源，再经中压调节阀输入低压管网，供给广大市民使用。煤气的总体流向是从高压至中压再到低压。

城市生命线系统的层次性对于震害研究与震后恢复有重要意义。例如，在城市煤气的各类管路中，易损性高的是低压管路，由于这些管路大多埋设在地下，用通常的方法不易发现震害的具体地点与震害程度，所需的恢复时间较长；如果高压管路发生严重震害，失去供气机能，中压与低压管路即使没有发生震害，也不可能为用户提供煤气。此时，修复高压管路是震后恢复的关键。又如，交通网络的层次性，在一般情况下，震后应当先恢复对交通运输起重大作用的干线，再恢复作用相对小的支线。

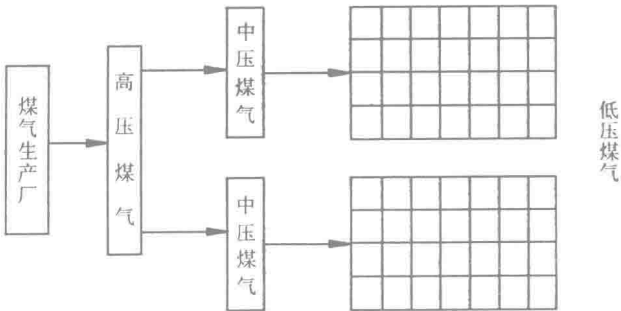


图 1-2 城市煤气网络的煤气压力层次

3. 构造震害与机能震害

构造震害是指城市生命线系统的各种生产与供给设施、各种管路与线路在地震中遭受的物理性破坏。而机能震害则指城市生命线系统的机能降低或丧失。二者既有联系，又有差别。在同一种城市生命线系统中，构造震害是机能震害的主要原因。例如，一座城市的发电厂发生严重震害，不能继续发电，必导致机能震害，城市电力网络的供电机能将降低或完全丧失。又如，煤气网络的某个中压设施受到严重震害，必须对其下游的管网立即停止供气，停止供气的地域便产生机能震害。但是在某些情况下，虽然发生构造震害，但不发生机能震害。例如，地震发生后，继续向给水系统构造震害比较小的地域供水，这些地域并未因构造震害产生机能震害。另外，有些城市生命线系统的震害是相互影响的。特别是电力系统的构造震害与机能震害，往往影响其它生命线系统。如果电力系统发生严重的构造震害与机能震害，不能给给排水系统、煤气系统、通信系统等提供电力，即使这些系统未发生构造震害，也会产生严重机能震害，失去供水、供气和传递情报的机能。研究城市生命线系统的构造震害与机能震害，对于震后恢复有极为重要的意义。

四、现代城市的主要特点与对城市生命线系统的依赖性

1. 现代城市的主要特点

随着社会的发展与人口的快速增加，世界性的城市化趋势越来越明显。与之相应，现代城市出现了人口集中、建筑物集中、生产集中、财富集中和多种灾害集中的“五集中”特点（叶耀先等，1993）。

据统计，世界城市人口占总人口的百分数，从1900年的13.6%上升到1980年的42.3%。解放初期，我国有城市36个，100万人以上的只有5个（北京市、上海市、天津市、沈阳市和广州市）；1988年增加到434个，100万人以上的有8个；到1995年末，全国设市超过640个，100万人以上的32个，建制镇1.6万个；到2000年我国城市已达668个。在长江三角洲、珠江三角洲、辽东半岛、京津唐地区已经形成比较完整的城市群体，城市数量在东西部地区分布不均的状态也在发生变化；预计到2015年城市数量将超过1000个。解放初期，我国城市人口为5765万，占全国总人口的10.6%；1990年增加到2.1亿，占总人口的18.7%；到1995年末，城镇人口已近3.5亿，占总人口的28.9%。经济发达国家的城市人口占总人口的比例更高。目前，日本80%的人口居住在城市，仅首都（东京市）城市圈、京阪神城市圈和中京城市圈就居住5000余万人，占日本总人口的50%左右。

地震多发的美国、日本、原苏联、中国和印度的城市人口增长趋势如图1-3所示（都市灾害与环境研究会，1998）。显然，无论是经济发达国家，还是发展中国家，城市人口几乎都

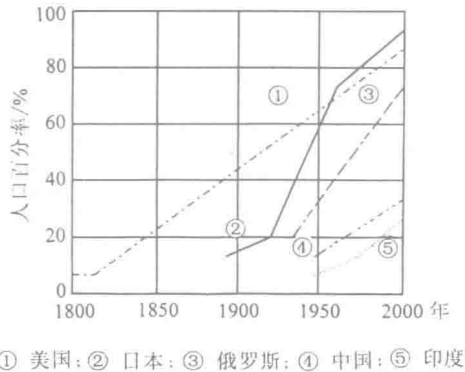


图 1-3 地震多发国城市人口的增长趋势

呈直线地快速增长。21 世纪初，美国、日本等经济发达国家的城市人口，都占本国总人口的80%以上。1970 年前后，日本城市人口的增长速度超过了美国。预计到 2010 年，我国的城市人口，占全国总人口的 39%，2050 年增加到 49%，将有六七亿人生活在城市。城市人口的急剧增加，促进了城市生命线系统的不断发展、完善，城市生命线网络构成越来越复杂，传送的物质和情报量越来越多，人们对城市生命线系统的依赖程度越来越强。一旦发生城市地震灾害，特别是大的震灾，城市生命线系统震害引起的灾害将殃及更多的居民。

为了给日益增长的城市人口提供良好的居住、生活、工作条件与环境,适应现代城市的社会经济发展,城市建筑物和构筑物的数量亦急剧增加。市区的地域范围不断扩展,在城市中心区和居民密集地域,建筑物与构筑物的密度日益增加,而且不断向空中、地下发展,出现了大量高层建筑物以及地下街、地下商场、地下铁路、地下隧道等。建筑物与构筑物的这种发展态势,给城市生命线系统的建设与发展带来诸多新的课题:①不仅城市生命线系统的网目密度增加,还不断向高层与地下发展。因此,一旦发生大的震害并诱发次生灾害,和低层建筑物相比,紧急救助、震后恢复以及次生灾害的消除难度大,而且有可能出现相邻建筑物生命线之间的连锁性震害。②有些地域的城市生命线系统不得不伴随着建筑物建在地基条件差的场地上,甚至建在填海造地等人工造地上,增加了城市生命线系统震害危害性。③要求城市生命线系统有更大的物质与情报的传递能力,采用更高的建筑技术,有更高的管理、服务水平和完善的防震减灾规划、具体实施措施以及恢复的战略、方针、方法等。

我国首都北京市以及各省、市、自治区的首府,是全国及各地方的政治、经济、文化、交通中心,在社会主义经济建设与精神文明建设中起着极为重要的作用。我国较大规模的工厂、企业、高等学校、科研机构、商场、金融部门等都集中在城市,特别是大城市,绝大多数物质产品与精神产品都是在城市产生的。我国工业总产值、上交利税、外贸出口与交通运输量的80%甚至90%以上来自城市。城市集中的地域对我国社会经济发展起更重要的作用。例如,长江两岸有上海市、南京市、武汉市、重庆市等大城市,还有南通市、镇江市、芜湖市、铜陵市、安庆市、九江市、宜昌市等中小城市,包括这些城市在内的长江经济“走廊”的工农业总产值占全国的40%以上。因此,如果在大城市或城市密集的地域发生大的地震灾害,必然造成极为重大的经济损失和社会影响。

我国的许多大城市都在地震区域内,有一半左右的城市、70%左右的100万人的城市位于地震基本烈度7度及其以上地区。北京市、西安市、兰州市、太原市、大同市、包头市、海口市等城市位于基本烈度8度的高危险区域内。

由于现代城市有“五集中”的特点,所以一旦发生大的地震灾害,一般会造成比较惨重的人员伤亡与重大的经济损失。而城市生命线系统的严重震害,也必然给更多的居民带来灾难,并严重影响城市的社会经济发展。

2. 现代城市对城市生命线系统的高依赖性

许多现代大城市的生命线系统形成了覆盖全市的、高密度的、层次分明的网络,有些城市生命线系统的用户数少则几十万,多则上千万,随时间推移,服务质量与管理水平不断提高,城市生命线系统传递的物质与情报量逐步适应不断增长的人口与城市发展的需要,现代高新技术在城市生命线系统建设与抗震减灾中的应用日益广泛,又提供了生产与使用的安全保障,创造了确保居民生活舒适、安全的良好条件与环境,而且有为城市社会经济发展提供能源、水源、交通和传递情报手段的能力与保障。随着城市居民生活条件、文化与情报需求的不断提高和城市社会经济的快速与高度发展,对城市生命线系统的需求与依赖性也越来越高。形成了城市生命线系统供需的一致性。需求的数量与质量的发展促进生命线系统建设的数量与质量的发展,使之更趋完善,更适应需求。所以,城市对生命线系统的需求以及城市生命线系统本身都是发展的概念,不断完善的概念。也就是说,需要不断调节供需矛盾,向更完善的境界发展。显然,城市对生命线系统的依赖性越高,一旦发生大的地震灾害,造成停水、停电、停(煤)气、通信线路中断或拥堵、交通堵塞,将大大降低城市灾民的基本生