

本书为中共中央宣传部暨国家社会科学基金重大项目成果之一



地震

灾后生命线工程修复加固与重建技术

仇保兴 主编

地震灾后绿色重建手册

中国建筑工业出版社

本书为中共中央宣传部2015年度马克思主义理论研究和建设工程
重大项目暨国家社会科学基金重大项目成果之一
课题批准号：2015MZD037

地震灾后绿色重建手册

地震灾后生命线工程修复 加固与重建技术

仇保兴 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地震灾后生命线工程修复加固与重建技术/仇保兴

主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 12

(地震灾后绿色重建手册)

ISBN 978-7-112-20077-1

I. ①地… II. ①仇… III. ①地震灾害-灾区-重建-研究 IV. ①D632.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 267786 号

本书为《地震灾后绿色重建手册》之一。本书主要包括总论、电力设施、给水工程、排水工程、燃气工程、交通系统、通信系统、环卫系统、避灾场所与避灾绿地等内容。

本书主要面向从事地震灾后房屋建筑和市政工程修复、加固与重建中, 参与决策、设计、施工、管理的工程技术人员以及村镇干部和居民等。

责任编辑: 于 莉 田启铭

责任设计: 李志立

责任校对: 焦 乐 李欣慰

地震灾后绿色重建手册
地震灾后生命线工程修复加固与重建技术

仇保兴 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

唐山龙达图文制作有限公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11 $\frac{3}{4}$ 字数: 280 千字

2017 年 1 月第一版 2017 年 1 月第一次印刷

定价: 37.00 元

ISBN 978-7-112-20077-1

(29536)

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)

《地震灾后生命线工程修复加固与重建技术》 编委会

主 编：仇保兴

编委会成员：武 涌 熊易华 刘桂生 包琦玮 张 益
徐文龙 李 杰 陈 新

编写组成员：

中国市政工程西南设计研究院：罗万申 徐 容 赵远清
周继辉 薛书达 万玉成
邬耐之 郭天木 丁顺琼
北京市市政工程设计研究总院：顾启英 倪 伟 刘庆仁
张慧敏 张 恺

同济大学：谢 强 刘 威

重庆大学：蒋 阳 柴宏祥 胡致远

中国移动通信集团公司：孔少楠 李 静

城市建设研究院：徐海云 翟力新 杨宏毅 王丽莉

上海市环境工程设计科学研究院：王 雷 冯 蒂 张雪梅

中国城市规划设计研究院：贾建中 刘冬梅 唐进群

哈尔滨工业大学：汤爱平 李 惠

修订组成员：

陈志端 陈 鸿 杨宝路 杨珊珊 曹学敏 尚金玲

《地震灾后绿色重建手册》丛书序

城镇是“人工与自然复合的复杂结构”，这种复杂结构是人类最富想象力、最雄伟的创造，同时也是人类自我创造的最危险的家园。人类社会发展已经步入“城市时代”，全球有超过一半人口已经居住在城镇。人类的居住方式从分散化转向集中的同时，也伴生着环境、安全、能源、社会、水资源等方面的危机。我国贯彻保护耕地、节约资源的原则，选择了以紧凑型城镇为主的城镇化模式，所有城镇每平方公里建成区的人口控制在一万人左右，紧凑型城镇有利于节约宝贵的耕地和节能减排，但也更容易放大各类灾害的效应。我国大陆处于地震烈度 6~9 度的地震区占国土面积的 60% 以上，2/3 的人口达到百万以上的城市处在地震烈度 7 度以上的高危险区。这就要求我国的城镇化策略更要注重城镇生态和安全的建设，对地震灾后的城镇推行绿色重建。

地震灾后绿色重建就是要总结国内外地震灾后重建的历史经验教训，以创新的精神和科学的思路来进行“创造性”的重建。这意味着要在充分认识灾区生态地理条件、地质地貌现状和原有经济社会发展特征等方面的前提下，从长远发展的角度来谋划城乡重建规划。这不仅仅意味着高效率地恢复城镇功能，更重要的是在原有的基础上赋予城镇新的发展理念和增添新地区价值。地震灾后绿色重建的目标，就是重建的城镇应该成为生态城镇，更加安全、舒适、有活力、更具有可持续性。

地震灾后绿色重建不仅需要怜悯、关切、激情，更重要的是需要冷静、科学的态度和理性的思考：要以更加开放的胸怀，更具创新性的理念，更广泛地调动各种各样的积极因素来帮助重建；要更加尊重生态自然环境，尊重普通民众的根本利益，尊重本地的传统文化和社会资本；要更加明确重建的目标、项目、步骤，不仅要为灾后的幸存者建造更安全、舒适的生态城，同时也要着眼于他们的子孙后代的生活更美好；重建后的城镇不仅仅具有生态城市的典范影响，而且具有可复制、可改进、可推广的深远意义。

弹性地建设城市系统、让城市能更好地适应各种环境变化，这一理念近年来成为学界研究的热门领域。对于地震灾后重建而言，借鉴弹性理念的绿色重建模式，是更加尊重自然、顺应自然的建设模式，也是适应力和恢复力更强并拥有学习和发展能力的韧性系统。“危机”意味着危难但同时也是机遇，遵循弹性设计与建设原则的修复和重建，可使受灾城市有更好的韧性来抵御后续次生灾害的冲击，并能够改变原先的演进轨道，跳跃性地获得抗灾害能力、系统的自主适应性和发展的可持续性，在修复重建的同时增强其对未来灾害的抵御能力。

在 2008 年汶川地震修复重建期间，我们组织相关专家编纂了《地震后重建家园指导手册》，为当时的灾后重建工作提供了强有力的技术支撑。2009 年，经过对内容的修订与扩充，我们又编写了《地震后重建技术丛书》。自 2014 年始，我们组织了中国城市科学研究会、中国建筑设计研究院、四川大学灾后重建与管理学院、中国城市规划设计研究院等单位相关专家，重新修订了《地震灾后生命线工程修复加固与重建技术》、《地震灾后建筑

修复加固与重建技术》、《地震灾后乡镇典型调查分析》等册，增补了《地震灾后重建案例分析》中的内容，增加了《地震灾后过渡安置与管理》、《地震灾后恢复重建模式》等册，并为了突出“绿色重建”理念，将丛书名改为“地震灾后绿色重建手册”，是中共中央宣传部 2015 年度马克思主义理论研究和建设工程重大项目暨国家社会科学基金重大项目“生态文明背景下的绿色城镇化研究”（课题批准号：2015MZD037）成果之一。近几年间，又有玉树、芦山等部分地区遭受了不同程度的地震灾害。在这些地区救灾和恢复重建的过程中，也积累了一些宝贵的经验教训，这些也成为本丛书修订增补的重要内容。

愿本丛书能成为今后指导地震灾后重建的重要技术参考，谨以此书献给为历次地震灾区救援与重建贡献力量的人们。

国务院参事、中国城市科学研究会理事长、
原国务院汶川、玉树地震灾后重建协调组副组长

仇保兴

2016 年 12 月 5 日

目 录

第 1 章 总 论	1
1.1 生命线工程系统构成	1
1.2 生命线工程系统历史震害特征	1
1.3 汶川地震生命线工程系统震害与特点	10
1.4 玉树地震生命线工程系统震害与特点	20
1.5 生命线工程灾后恢复与重建原则	22
第 2 章 电力设施	24
2.1 技术总则	24
2.2 电力设施建（构）筑物修复与重建技术	24
2.3 输电线路修复与重建技术	29
2.4 变电站设备修复与重建技术	30
2.5 国外借鉴：日、美电力设施震后恢复重建技术	32
第 3 章 给水工程	34
3.1 技术总则	34
3.2 应急阶段基本技术措施	36
3.3 水源地修复与重建技术	38
3.4 给水处理厂及给水泵站修复与重建技术	40
3.5 给水管网修复与重建技术	47
3.6 水塔修复与重建技术	51
3.7 国外借鉴：日本阪神—淡路地震供水系统震后恢复实例	52
第 4 章 排水工程	54
4.1 技术总则	54
4.2 应急阶段基本技术措施	56
4.3 排水管渠系统修复与重建技术	57
4.4 污水处理厂（站）及排水泵站修复与重建技术	61
4.5 排放口修复与重建技术	67
4.6 国外借鉴：日本阪神—淡路地震排水系统震后恢复实例	69
第 5 章 燃气工程	72
5.1 技术总则	72
5.2 震时（强余震）紧急控制技术措施	73

5.3	震后快速修复应急供气	75
5.4	修复重建基本技术	82
5.5	用户端灾后供气	90
5.6	国外借鉴：日本阪神—淡路地震供燃气系统震后恢复实例	91
第6章	交通系统	93
6.1	技术总则	93
6.2	交通系统评估与鉴定	94
6.3	交通系统修复与加固技术	104
6.4	交通系统重建技术	113
6.5	交通系统施工验收	117
6.6	国内外借鉴：交通系统震后修复与重建技术研究经验	117
第7章	通信系统	124
7.1	技术总则	124
7.2	通信系统建（构）筑物的修复与重建技术	124
7.3	建（构）筑物及主要通信设备的隔震改造修复技术	128
7.4	通信系统设备的修复与重建技术	130
7.5	震时保障关键机构通信畅通的相关技术	131
7.6	国外借鉴：应急通信系统的建立完善实例	133
第8章	环卫系统	135
8.1	技术总则	135
8.2	环卫系统评估与鉴定	137
8.3	建筑垃圾收运处理系统修复与重建技术	145
8.4	生活垃圾收运处理系统修复与重建技术	153
8.5	国外借鉴：日本震后固体废弃物分类处置实践经验	160
第9章	避灾场所与避灾绿地	163
9.1	汶川地震避灾场所概况	163
9.2	城市避灾场所用地分析	164
9.3	避灾场所与避灾绿地建设措施建议	166
9.4	国外借鉴：日本避灾绿地建设实践经验	168
附录	相关法规标准规范	172
	参考文献	176

第 1 章 总 论

1.1 生命线工程系统构成

城市生命线工程系统是维系现代城市功能与区域经济功能的基础性工程设施系统，包括：电力设施，给水排水及其管网系统，燃气及管网系统，交通系统，通信系统，环卫系统，避灾场所等。这样一些系统在地震作用下的破坏往往会导致城市功能的丧失，严重者会导致整个城市处于瘫痪状态，如：停电、停水、燃气供应停止、交通瘫痪和通信中断等。

生命线工程系统都是由一批工程结构构成的，工程结构是生命线系统的客观载体。例如：在电力系统中，存在电厂主厂房、高压输电塔、各类变电站建筑等，即使是高压输电设备（如各类电容互感器、绝缘子、断路器等），也可以视为是一类工程结构；在城市供水系统中，存在供水泵房、水处理水池、输水管线等各类工程设施；其他如交通系统中的道路与桥梁、通信系统中的枢纽建筑与通信设备，无一不具有工程结构的基本特征。生命线工程系统的另外一个特性是它们大多以一种网络系统的形式存在且在空间上覆盖一个很大的区域范围。如高压输电网络、区域交通网络、城市供水管网等。网络系统的功能不仅与组成系统的各个单元的功能密切相关，而且与各个单元之间的联系方式（主要表现在网络拓扑特征）密切相关。

因此对生命线工程系统的灾后恢复重建不仅仅要从结构、设备上考虑，还要从系统整体上来考虑，以保证生命线工程系统整体的抗震性能。

1.2 生命线工程系统历史震害特征

生命线系统往往穿越不同的地质单元，其系统结构形式又具有网络特征，并且不同的生命线系统单元物理结构形式多样、抗震设计方法差异大，所以与建筑物相比，生命线系统和单元有更大的地震易损性，抗震设计理论和方法更为复杂，这也是生命线地震工程正迅速发展为一门独立学科的动力。历史地震资料表明，生命线系统的震害特征可以概括为系统单元的自身物理破坏和功能的中断两大类，其震害产生的原因除地震动的直接作用外，更多是地震导致的地质灾害事件或其他次生灾害的作用。下面以近 20 年来部分典型地震中生命线工程系统的破坏为例，说明生命线系统的震害特征和减轻生命线系统震害程度的主要措施。

1.2.1 生命线系统的单元结构震害特征

生命线系统结构类型可以概括为埋地生命线和地上生命线两大类。埋地生命线系统可划分为地下管网结构和隧道结构两种类型，其破坏的主要原因在于岩土体的大位移（PGD）和地震动强度。一般而言，在地层岩性或结构发生变化的地方、软弱的地层、各种地质构造结构面附近，埋地生命线系统破坏最为严重。

埋地管网在地震中的破坏特征受诸多方面的影响，其中地震动强度、场地岩土性质、管道通过地区的地质环境、地理环境、管道自身的特征（材质、接口方式、敷设方式、几何尺寸、腐蚀情况）对其影响最大。不同管道在不同条件下表现出不同的震害特点。震害资料表明埋地管网的破坏类型主要包括以下几种：管身的折断、纵向开裂、环向裂缝、剪裂、穿孔、拱起、弯曲、拔出、蛇曲、扭转变形。接口处的破坏形式有：承接口的开裂、压扁、拉开、剪开。这些破坏形式反映了轴向的受压、受拉，横向的挤压和剪切，竖向的挤压、扭转的力学性质。下面是一些埋地管线在地震中的震害实例。

(1) 1923年9月1日日本关东8.3级地震，东京供水管道在982km的铸铁管中有227处破坏，震害率为0.23处/km。管道接口破坏率81%，横滨市配水管道（100~900mm）破坏10%。东京管道的破坏特点是出现裂缝和折断，小口径管道破坏数量最多（尤以石棉水泥管为主），口径200mm以下的管道占总破坏管道的93.55%。破坏基本集中在丘陵向平原的过渡区，此处岩性由密实土向软土变化。土体出现明显的竖向位移、横向位移，地形和岩性突变是管道破坏的直接原因。钢筋混凝土质的供水管网损坏统计表明了管道埋深与破坏的关系，当埋深小于2.4m时，随埋深增大，破坏逐渐加剧，超过2.4m后破坏明显下降。在没有断裂存在的环境中，随埋深的增大，土对管的约束增大，土管变形一致，两者变形都比浅部小。同时，在分析管线走向与地震波传播方向之间的关系中也发现了如下的规律：地震波传播方向与管道走向一致时，震害比两者相垂直时大近1倍。

(2) 1964年新潟地震（7.5级）中，新潟市68%的输水管破坏，以三通、弯头损坏，接口拔出和松动为主要的破坏形式，也有部分小口径（ $\phi=100\text{mm}$ 以下）的石棉管出现折断，破坏主要是管径为 $\phi 200\text{mm}$ 以下铸铁管和石棉管。从破坏的煤气管道材质分析得出了钢制煤气管道抗震性明显高于铸铁管（钢管每千米破坏数量0.88，铸铁管2.39），造成破坏的主要原因是土层中明显的变形、地表裂缝、不均匀沉降和砂土液化。在不同岩性土中表现出不同的管道损坏原因：硬土区，与地震波方向平行埋设的管道损坏严重（三通、弯管、支管部位）。硬土区及硬土—软土的过渡区破坏的原因都是管周围土未均匀变形（位移）所致。冲积软土区（管道破坏最严重，占总破坏数量的54%），破坏形式为因竖向地震力作用而引起的环形截面断裂，不均匀沉降引起的屈曲、砂土液化导致的管地基不均匀沉降而导致的人孔隆起、接口松动和地震波作用下的拉伸作用导致的接口拔出和松动。

(3) 1971圣费尔南多地震（6.7级）中，横向扩展及其造成的地表断裂、液化导致的滑坡、永久地面变形和地震动波动效应是管道破坏的主要原因。管道破坏的三种主要形式，弯管弯扭变形，焊接伸缩接头反复碰撞、压缩褶皱变形，机械式偶联管冲击压缩下变形。横向扩展的方向与管线走向垂直。管道大多埋在冲积砂和砾石层内，埋深0.75~1.5m。

(4) 1975年的海城地震（7.3级）和1976年的唐山地震（7.8级）中，地下管道震

害表明了地震烈度、场地类型、地理环境、地质环境和管道自身特征（材质、口径、埋深、接头形式等）是决定震害轻重的主要因素。震中区管道震害大，且有大口径（直径 $>400\text{mm}$ ）管道的破坏；离震中相同距离处，Ⅳ类场地震害比Ⅲ类场地明显加剧，唐山市路南区（覆盖层达 100m 以上）比路北区（覆盖层 $5\sim 6\text{m}$ ）地下管线震害大得多；地形、地貌对震害的影响主要表现在当地地形起伏大，沉积物新的地区震害加大。地形不仅影响着地震波的传播，也影响着其他次生地质灾害的分布。沉积物新的河谷地貌、岩性不均质的平原、三角洲地貌的地区地下管线震害明显加重。管线的走向与断裂平行（非发震构造）时管道震害轻。柔性接口的管道破坏形式主要是拉开和松动。刚性接头管道在接口处出现承口掰裂、接头剪裂、管道拉断、松裂、折断、纵向裂开、环向裂开、剪切裂开。延性、强度均高的管材震害轻。小口径管道比大口径管道震害明显重。

(5) 1976年和1984年发生的加兹拉地震（7.3级和7.2级），地下管道震害表现出如下的震害特点：管网走向（SN）与地震波传播方向相垂直时震害轻；竖向地震作用占优势，且多发生大口径管道支墩裂缝而使管道位移和转动；小口径（ $100\sim 300\text{mm}$ ）钢管折断，铸铁管和石棉水泥管体裂缝（接口附近），铸铁管接口附近起鼓；竖向地震作用下，柔性管震害轻。

(6) 1994年北岭地震（6.7级）中，洛杉矶市的供水管网破坏严重（破坏最严重的地区位于圣费尔南多峡谷中）。三条主干输水管道遭受了破坏，原因是地震波和永久地面变形的作用。震中附近许多直径为 1020mm 和 1370mm 铆接和焊接的钢管遭到破坏。铺设在冲积土层中的钢管干线，在接口处均表现出压缩屈服和张拉的破坏性质，管身有环形裂缝，另外在管道与其他配套设施的接口处也出现拉开、拉裂的破坏，钢管、混凝土水管管身发生破裂和渗漏。这次地震中供水管网的配水网络破坏主要是铸铁管的破坏，其次为钢管，两者分别占总破坏的72%和21%，而主干管网则以钢管破坏为主（66%），混凝土管（15%）和铆合钢管（14%）次之。主干管道的破坏主要集中在管径大于 890mm 的管道，配水管破坏主要发生在管径 $100\sim 200\text{mm}$ 的管道（88%）。

(7) 日本阪神地震（7.2级）中，埋地供水管线的破坏与活动断层相关，岩土性质和地貌特征也是致灾因素之一。在离断层 1km 范围内，供水管震害严重，其中尤以断层 $0.4\sim 0.8\text{km}$ 处为重。供气管线的破坏主要发生在延性较小的螺纹接口处（33%的螺纹接口破坏），而延性接头和滑动接头基本无损坏（见图1-1~图1-3）。

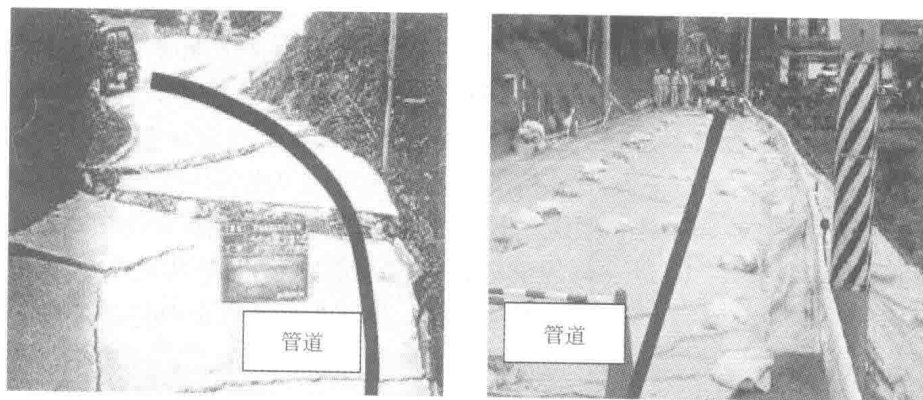


图1-1 神户地震中由于土体大变形导致的管道破坏（粗实线为管道位置）

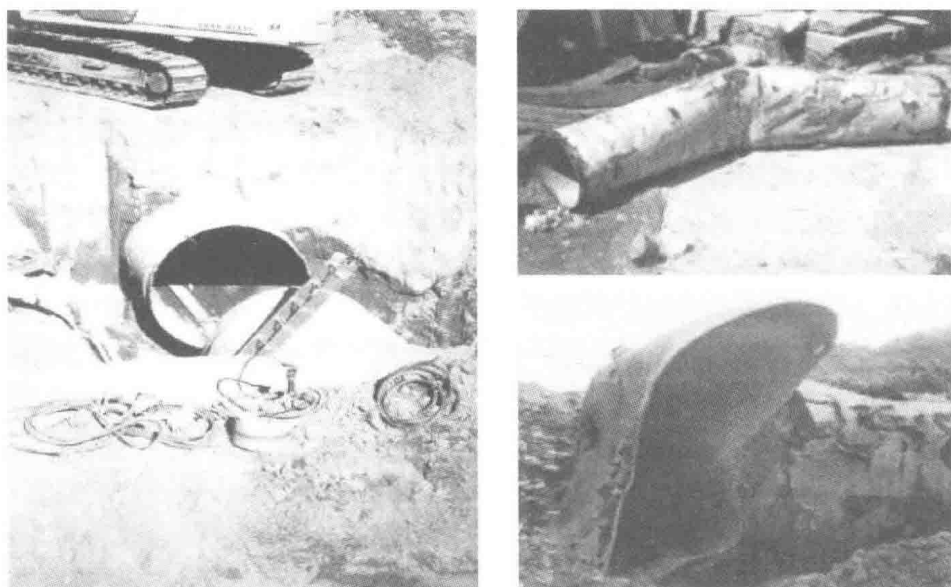


图 1-2 地震中管道系统被拉开和发生屈曲

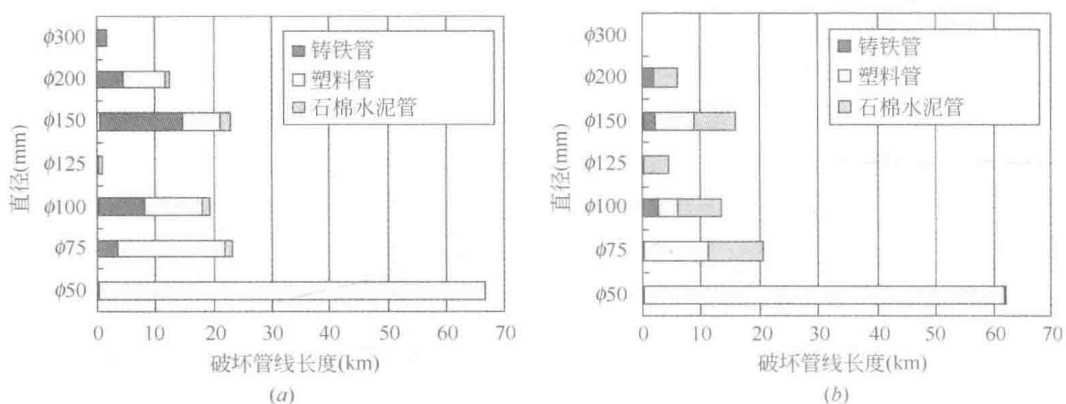


图 1-3 日本两次地震中不同材质、口径的管线破坏程度 (震级分别为 7.1、8.3)

(a) 浦川地震 (1982); (b) 十胜地震 (2003)

从上述震害事例可以看出,埋地管道系统的破坏具有如下规律:1)在地质单元、地理单元交界处震害严重;2)离震中愈近,破坏愈严重,离发震断层愈近,破坏愈严重;3)永久地面大变形(液化层、断层带、滑坡带等)区管道破坏严重;4)不同材质、口径的管道破坏程度不一样。

地下结构的另一类结构——隧道结构的破坏也是近些年来关注的重点,埋地的隧道结构主要有共同沟系统和铁路、地铁系统。过去一直认为这类结构具有良好的抗震能力,但近些年来的地震事件表明,隧道结构的破坏也是常见的。1971年的日本宫城地震中,仙台市一共同沟接口被拉断、沟身出现纵横向裂缝,造成大量的泥砂和地下水涌入,使共同沟内的供水、排水和供气管道破坏。仙台市的共同沟内电线、电缆和管道系统因固定支架或支座折断而发生了横向或纵向的位移而破坏。1978年伊豆尾岛地震中因断层作用使稻取铁路隧道严重破坏。

1993年的能登半岛地震更是造成一隧道拱顶冒水、坍塌、涌水等破坏。1995年的神户地震中，一共同沟内的供水系统破坏导致水流入到同一沟内的供气系统中，导致供气系统的功能下降。在美国，1964年的阿拉斯加地震中，一共同沟在液化导致的地面大位移作用下被拉断。1971年的圣费尔南多地震中，一共同沟由于土体的横向大位移而错断。1989年的Loma Prieta和1994年的Northridge地震中，也有共同沟破坏的现象。共同沟的地震破坏现象表现为沟身开裂和接口断开、衬砌破坏以及沟内收容的生命线系统在地震作用或沟身破坏下引发次生灾害而破坏（管道断裂、支架折断、固定装置的破坏和电缆、电线拉断）、人孔沉降和压扁等现象。1995年的神户地震中，神户市地铁破坏严重，神户高速铁路的东西线和神户市营山手线上的18座地铁车站中有5座车站遭到明显破坏，破坏的形式是中柱破坏（钢筋被压弯外露，许多箍筋也完全破坏，破坏位置为柱脚和柱-顶板连接处）、侧墙出现了水平裂缝和斜裂缝、衬砌开裂与塌落等。1999年的台湾地震中也发生了隧道的破坏。

地上生命线系统的破坏则主要表现在地面交通系统、地面管道系统、供电系统等的破坏。地面交通系统中，桥涵的破坏、道路和铁路轨道系统的破坏最为常见（见图1-4）。1994年1月17日美国Northridge的6.8级地震中，出现桥梁的严重破坏，7座桥梁（包括1座立交枢纽）坍塌、部分倒毁，导致交通系统部分处于瘫痪状态。与Loma Prieta地震类似，电力系统230kV和500kV的高压变电站同样破坏严重，一批高压输电塔因砂土液化而倾倒或损坏，110万用户失去供电。1995年日本阪神7.2级大地震中，交通系统遭到大面积破坏。地震区6条铁路线均遭到严重破坏，许多高架桥倒塌或部分倒塌。阪神高速公路神户线共有1192个桥墩，其中611个在地震中遭到破坏，破坏率达52%，在这些破坏的桥墩中，约150个已不可修复。神户地铁大开车站，震时车站的立柱遭剪切破坏使隧道洞顶塌落，震后地震面出现120m长的陷落，最大沉陷处深达3m。同时，神户港受到毁灭性打击，堤岸有80%遭到破坏，部分地段堤岸产生的裂缝达3m之深。地震后，100万用户断电，修复工作持续6d，电力系统破坏主要集中在275kV变电站和77kV变电站（共48处），直接经济损失达550亿日元，配电线路损坏446个回路，损失额达960亿日元，火力发电厂亦有10处破坏，损失额达350亿日元。地震区的神户市、西宫市等9市共有136万户全供水家庭，地震后，由于主干供水管网发生1610处破坏，迫使110万用户断水（断水率达80%）。一周后，供水系统仅修复1/3，全部修复工作持续了两个半月。由于缺水，严重阻碍了救火。供气系统同样在地震中遭受严重破坏。据震后统计，主干供气线路破坏了5190处，其中，中压线路破坏109处。85.78万户用户被中断供气，修复工作持续了3个月。地震使神户地区3170条专用通信线路遭到破坏，以神户市为中心的兵库县南部地区19.7%的通信线路因交换机发生异常和通信线路破坏而中断，一批通信设施遭到破坏，其中一些通信大楼因处于危险状态而被迫停止业务。1999年台湾集集

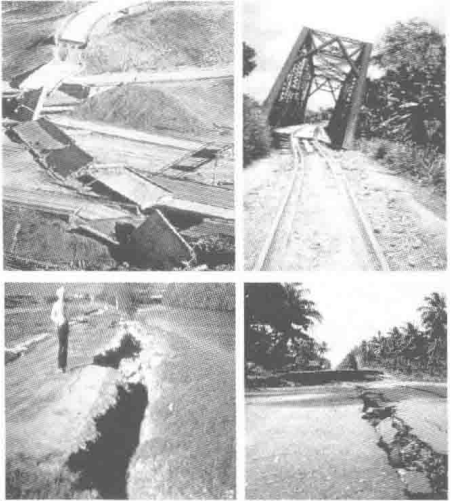


图1-4 地震导致的地面交通系统破坏

7.3级大地震造成台中地区交通中断,名竹大桥等一批桥梁坍塌,台中火车站、集集火车站等严重破坏,铁路路轨弯曲、电车线断落。由于电力系统的破坏,造成台湾中北部地区大面积停电,累计停电户517万户,直接经济损失达59.4亿元台币。水利设施经济损失达47.2亿元台币、供水管线损失达9.5亿元台币。

1.2.2 生命线系统功能上的震害特征

生命线系统具有网络结构,所以其中任意单元(节点)的破坏都可以造成整个生命线系统的功能异常,关键节点的破坏甚至可以使整个系统功能中断,即使其物理结构完好。每个生命线子系统是各具有与其自身功能特征相适用的复杂网络结构体系,并且不同生命线子系统间常常相互关联,一种网络系统功能的发挥常常依赖其他系统的正常运转,一种网络系统的破坏易引起其他系统的相互作用破坏,这种功能上的依赖性将生命线系统构成成为一个相互作用的大体系。所以一个生命线系统结构破坏除造成自身功能的中断外,还可能导致与之相关的其他生命线系统功能破坏,即不同生命线系统间功能相互作用、相互影响,这种现象,我们称之为生命线系统的相互作用。

生命线系统相互作用形式主要表现在三个方面。第一,功能上的相互依赖性,即每个子系统在功能正常发挥的情况下,能量的供给和功能的输出与其他子系统功能的正常密不可分。比如,通信系统功能的畅通依赖电力系统和供水系统等的功能正常,同时通信系统的破坏将导致震后应急供电、供水的调度。第二,破坏后功能恢复、修复进程的相互影响。道路系统的破坏将制约包括生命线各子系统在内的整个救灾工作的开展,通信和电力的破坏将进一步加剧交通秩序的混乱,附挂于桥梁的其他生命线管线因桥梁的垮塌而破坏,供水系统功能的恢复依赖于供电系统的恢复,供电系统功能的恢复依赖于通信系统、供水系统功能的完备。在地震中,为避免次生火灾和爆炸的发生,常常出现因供气系统、输油系统的破坏而不得不停止供电的情况。在供水管线与供电系统并排铺设的情形中,为避免触电,供水修复时供电停止。第三,破坏的辐射。在生命线系统的建设过程中,出于经济、方便、快捷等方面的考虑,一些生命线的管道系统部分是沿道路系统而建的,因此,在道路破坏的同时可能将附近的管道系统破坏。反过来,一些管道系统的破坏可能导致道路系统的破坏,电力系统的破坏导致输气、输油系统的破坏等,这些破坏形式在地震中是非常常见的。

下面地震中生命线系统的震害表现正体现了生命线系统相互作用的本质。

日本是世界上地震发生最为频繁的国家,多次地震调查中揭示出的生命线系统震害特征具有较好的代表性。宫城近海地震(1978)促进了“生命线地震工程学”在日本的迅速发展。宫城近海地震中,在石卷市,由于地震破坏电力系统导致全市停电。因没有自备的应急电源,水泵不能使用,以致不能供水的局面持续了20h,约3.2万户受害。在仙台市,排水设施遭受轻微破坏(不致引起日常生活的不便),但是由于地震后的停电(虽有自备电源)造成正常运转的设备少,使得8处水泵厂不得不把未经处理的水排入河流与沼泽。同时,由于4处断水,使得自备发电装置因冷却水和润滑水不足而不得不停机,水处理工作终止。伴有砂土的地下水从排水管道的开口处进入(合流式处理方法),引起了地表的下沉或隆起,阻碍交通。因停电而导致以仙台市为中心的13.6万个用户供气停止4~17d。通信系统中,仙台市的总共7条同轴电缆线有4条被破坏,通信中断达20h,破坏

的原因之一是架设在桥梁上的通信电缆因桥梁的破坏而受损。同时，因电话局停电，不得不启用自备的电源，通信能力受到一定的影响。

1995年的神户地震中生命线系统相互影响表现极其突出，在该次地震中供电中断了6d，导致由电力支持的通信系统网络中断而引起救灾应急指挥系统的瘫痪，通信线路严重阻塞，通信应急电源因缺水而不能工作。交通信号停止运行而引起交通控制困难，加剧了交通的堵塞。由于通信系统的破坏，交通信息不能实时传递，导致了交通状况的进一步恶化。电力系统的破坏与供气系统破坏的共同作用而导致发生多处火灾，烧毁了100万 m^2 建筑。供气管道的破坏耽搁了供电的恢复。供水系统、排水系统因供电中断而失去功能，同时引起应急关闭阀停止工作。因Higashinada污水处理厂的破坏导致污水直接排到Osaka湾。供水系统破坏导致水流入到埋地的供气系统中，严重影响供气系统的恢复。交通系统的破坏严重制约着供气系统功能的恢复。

圣费尔南多地震、洛马普勒塔地震（1989，见表1-1）和北岭地震中这种情况也较普遍。圣费尔南多地震（1971）中，Newhall一中央通信大楼因一条主供水管道破裂而被淹，导致通信中断，污水管道的破裂导致了一些地区生活供水延误。连接5号和210号国道的立交桥破坏最为严重，上部高15~20m的曲线高架桥7个桥孔连桥墩全部倒塌，导致下部桥梁的破坏，同时中央横梁倒塌在铁路上，使铁路运营停止。在西尔马—圣费尔南多（Sylmar-San Fernando）地区由于总水管的破裂而被淹，阻碍了供气系统的泄漏检查与抢修。北岭地震（1994）中，在Pacomia的Wolfskill大街，因一油管破裂引发的火灾与爆炸毁掉了2座房屋和17辆汽车，铺设于同一沟壑中的9条管线和其上部的多条生命线全部毁掉（见图1-5）。供水管道的破裂造成桥台填方的冲刷而使基础破坏。



图1-5 北岭地震中生命线系统的相互作用

洛马普勒塔地震中生命线系统的相互作用

表 1-1

种类	电力系统	供气系统	供水系统	污水处理	公路系统	城市地铁	通信系统
电力系统		电力系统短路而发生气体爆炸,恢复工作与电力系统配合进行	抽水泵站因停电而中断工作 18h,修复工作也因停电而无法进行。停电导致大面积停水	泵站因停电而中断工作,排水能力下降	因信号灯无法工作而导致交通堵塞	因电能紧缺而不得不减少停站数	电力破坏使许多地区中断通信 3h 以上,一些地方通信能力下降
供气系统	泄漏检查、防火耽搁电力系统恢复		没有有效的处理办法,恢复工作与输气系统相配套		因火灾导致道路的封闭	地铁因煤气泄漏而关闭、地铁火灾	影响通信的恢复进程
供水系统	供电系统冷却系统破坏	恢复工作与供水系统相配套		根据水管破坏的情况来探测水道破坏	管道渗漏导致路基、路面破坏	缺水导致火灾蔓延,加剧了地铁的破坏	太平洋钟声公司在洛杉矶的一电话总局一柴油机供水冷却系统破坏而使 3/5 的交换机停止工作
污水处理			由于污水泄漏污染水源导致供水中断				
公路系统	中断交通,导致发电机燃料无法及时送到		由于桥梁破坏而导致交通工具不能运送抢修所需物资	根据道路破坏的情况来探测水道破坏		由于公路破坏或交通管制导致乘客量剧增	
通信系统	通信系统的拥挤,导致震害信息传递困难	抢修工作的调度困难	通信不畅使调水困难导致一些地方供水系统超负荷运转	检查、检修困难	交通调度、抢修的困难	调度、抢修的困难	

大多数通信系统设备因断电而不得不启用备用电源,使一些地区通信不畅,一些设施因缺水而引起冷却功能破坏而导致通信能力的下降。墨西哥地震(1985)中供电系统的破坏导致地铁的停运(地铁本身物理结构基本无破坏)。土耳其伊兹米特地震(1999)中,由于地震后连续 2d 的通信中断,致使应急处理中心不能进行有效的灾害评估和实施救灾协调。总统德米雷尔由于道路的中断(因通信的中断而使交通中断信息无法传递)而不得不在经过 6h 的公路行程后而原路返回。由于交通系统的破坏导致供电系统、通信系统、供水系统等的修复进程缓慢。

在国内,生命线系统在地震中的相互作用也是屡见不鲜。海城地震(1975)中,在营口市郊后塘附近,由于埋设于铁路路基下一直径为 600mm 的铸铁管接口拉开 220mm 而冲垮了铁路路基,海城镇(Ⅸ度)因供电停止 9h 而导致供水中断。盘山镇南的盘山桥(Ⅶ度,连接盘山和营口的公路桥)因桥双柱台墩(7号墩)折断而使架于墩帽上直径为 22cm 的输气管道被落梁砸断。唐山地震(1976)中在近码头和港口的输油系统破坏导致石油的泄漏和火灾,致使水上交通系统瘫痪。唐山机场通信系统的损坏而使空中交通严重

受阻。滦河桥为公路、秦京输油管（钢管）两用桥，地震中桥第1~23孔的输油管道被落下的人行道板和倒塌的桥墩砸断掉入河中，输油管线破坏。在阜家庄至雷庄间的82号桥（X度区），由于桥梁移位导致桥梁上通信支座移位，使附近514~573号通信电杆移动0.5m，造成线路中断和混线。在唐山市东隅陡河上的胜利桥（连接胜利路至天津—秦皇岛公路）处，由于桥位滑移，造成附近电杆滑移，铺设于桥位附近的河底钢管水道向上隆起2m多。京津唐电力系统中心调度所与系统东部的各电厂、电站通信联络中断，造成电力中断。电力线载波站也因失去电源而中断通信，同时，断电造成断水，由于供电的中断，唐山未被破坏的供水系统也不能正常供水，在震后的第4天才恢复局部的供电、供水。台湾集集地震（1999）中，台中市欣中天然气公司管辖的天然气管道由于道路下陷造成多处管线断裂漏气。欣林天然气公司管辖的草屯、中兴新村、雾峰、太平、埔里、南投市等地也因路面隆起或下陷等原因造成中油供气干管断裂、输气主干管断裂。欣彰天然气公司的丰原、东势、石冈、新社、彰化等服务地区，由于道路扭曲变形和多处房屋倒塌，造成天然气管线断裂漏气，总计管线受损约181.8km，必须更换的比率为70%。竹名天然气公司由于所在地竹山镇电讯及电力中断，乃迁移至名间乡赤水仓库的临时救灾中心。地震造成名竹大桥断裂，造成附挂在该桥的6英寸输气钢管断裂（此管线为供应竹山、鹿谷、集集的主干管道，断裂后造成该三乡镇断气）。通信系统中断的原因，除基地台或中继站结构物抗震能力不足之外，尚有断电的因素。供水管道附挂于桥梁的管线因桥台移动而造成伸缩接头扭曲。由于通信系统的破坏耽搁了供水系统的修复工作。在Yuanling市由于沿Changtzu路和Shingping路一条直径为150mm的PVC水管的破裂导致道路路面沉陷，交通受阻。耿马地震（1988）中，由于交通系统的破坏，通信系统和供水系统的维修、恢复受到严重阻碍。中国近代地震中生命线系统的相互作用见表1-2。

中国近代地震中生命线系统的相互作用

表 1-2

地震	生命线类型	供水系统	电力系统	通信系统	交通系统	供气系统	输油系统	输气系统	排水系统	医疗系统	治安系统
海城地震震级 $M_I=7.3$ 最大烈度 $NMI=IX$		停电使供水停止	通信系统破坏导致供电分配困难	停电导致通信中断	供水管道的破坏导致路基冲毁			输气管道因桥梁被砸断		交通不便导致小分队行进困难	
唐山地震震级 $M_I=7.8$ 最大烈度 $NMI=XI$		电中断导致供水系统不能供水；桥位滑移，造成桥位附近的河底钢管水道破坏	通信联络中断，造成电杆滑移，造成电杆移位	电力造成通信困难；桥梁移位导致通信支座上通信线载波站失去电源而中断通信	供水管道的破坏导致路基冲毁；有关影响水上交通、机场通信系统而使空中交通严重受阻	电力与供气系统接触火灾发生，加剧了灾害发生，两者	桥墩输油管被砸断		供水系统与排水系统混合水质污染	停电导致医疗系统瘫痪	多种生命线系统破坏，出现多种犯罪事件