

# 震后生命线系统功能恢复初步研究<sup>\*</sup>

钟江荣, 张令心<sup>♣</sup>

(中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 中国地震局工程力学研究所  
地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 针对地震造成的供电、通讯、供水和燃气 4 类生命线系统破坏的功能恢复开展初步研究。基于日本宫城地震和阪神大地震的这 4 类生命线系统功能的震后恢复时序调查资料, 结合我国生命线系统特点, 建立了指数形式的生命线系统震后功能恢复函数, 并定义了恢复函数衰减指数  $A$ 。在总结我国几次地震生命线工程震害特点的基础上, 确定了 4 个系统衰减指数取值区间和原则。最后, 将唐山大地震震后供电、通讯和供水 3 个系统和汶川地震震后绵阳市供气系统的实际恢复时间与由功能恢复函数计算所得时间进行对比, 结果表明 2 组数据符合度较高, 验证了所建立的生命线功能恢复函数的有效性, 且  $A$  是可反映各生命线系统重要程度、修复难易程度及震后应急决策修复措施有效性的综合变量。

**关键词:** 生命线系统; 功能恢复函数; 恢复函数衰减指数; 功能失效; 地震损失

**中图分类号:** P315.94      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2020)03-0517-05

## 0 引言

城市生命线工程是指维持城市生存功能系统和对国计民生有重大影响的工程, 主要包括供电、供水、交通、通讯、燃气 5 大系统。每类生命线系统包含不同的建(构)筑物和不同的设备设施, 并且彼此相互联系, 构成了一个复杂的网络系统; 每种生命线系统都是由多个子系统组成的复合体系, 不同的生命线系统有其独有的特征。历史震害表明, 发生于现代城市的破坏性地震, 都会对城市生命线工程造成严重的破坏。如 1995 年 1 月 17 日, 日本兵库县南部阪神·淡路地区发生了 7.2 级强烈地震, 死亡 5 438 人, 伤 24 523 人, 直接经济损约 800 亿美元, 生命线工程遭到普遍的破坏, 城市生活受到很大影响, 几个月后其功能才基本恢复(中国赴日地震考察团, 1995)。

地震不但给城市生命线工程本身造成破坏, 由此产生直接经济损失, 更为重要的是, 生命线工程自身的破坏会使其应有的功能受到影响, 这将带来更为严重的社会经济生活的影响和损失。因此, 生命线工程地震破坏评估研究, 既包括生命线工程自身破坏研究, 也包括由此引起的功能

失效的研究。地震造成的这种生命线工程功能失效不是瞬间即逝的, 也不会自动恢复, 需要随时间变化逐步恢复。对于不同的生命线系统, 其本身的特点、恢复的难易程度和震后恢复的重要程度都不同, 其恢复的过程也不尽相同。总的来说, 恢复时间越长, 对城市造成的影响越大, 损失也越严重。

目前, 生命线工程对震后城乡社会经济生活秩序的恢复影响巨大, 是韧性城乡评估体系中的一个重要指标, 但在我国相关研究中还未见报道, 因此, 亟需开展相关研究。由于国内缺乏生命线工程震后功能恢复和时序的调查资料, 本文将基于日本宫城地震和阪神大地震的相关调查资料, 结合我国唐山大地震、汶川地震和芦山地震后生命线工程损失调查资料, 从宏观层面对供电、通讯、供水和燃气 4 类生命线系统震后功能恢复模式进行初步探讨, 初步建立了这 4 类生命线系统震后功能损失恢复曲线, 为今后该系统震后因自身功能下降带来的损失评估提供参考。

## 1 生命线系统特点及其震害特点

要建立生命线系统的震后功能损失恢复曲线,

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-03-03.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1500606)资助.

♣通讯作者: 张令心(1967-), 女, 研究员, 博士. 主要从事地震工程研究. E-mail: lingxin-zh@126.com.

首先需要对生命线系统的特点有正确的认知。与房屋建筑结构相比,生命线系统具有以下几个显著特点:

(1) 网络性:生命线系统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。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(主要表现为网络拓扑特征)密切相关。

(2) 复杂性:各类生命线系统都是由一批工程结构构成的,工程结构是生命线工程系统的客观载体。这些工程结构不但各自特征复杂,而且其所处周围环境也各不相同,既有埋地管线、通讯设施;也有复杂场地下方的构筑物,如隧道、跨海大桥等;还有各种复杂设施、设备等。这些工程结构或者元件的破坏,也会影响到生命线工程系统所提供的社会功能。

(3) 耦联性:不同的生命线工程系统在功能上往往具有耦联性,一个系统的功能失效可能会影响到其它系统的正常运行状态等。在强烈地震发生时,这种耦联作用甚至更加显著和广泛(钟江荣,2001)。

由以上分析可以看出,这些生命线系统的特点对震后生命线功能失效和恢复时间都会产生重要影响。

本文收集了我国唐山大地震(杨文忠,2006)和汶川地震以及芦山地震生命线工程震害资料<sup>①</sup>(叶飞等,2013a, b; 刘如山等,2013; 刘金龙等,2013),通过分类总结发现,地震对生命线工程地震破坏及其功能损失影响和恢复有以下几个特点:

(1) 地震震级越大,灾区的影响范围越大,生命线工程的破坏分布范围也将更加广泛,并且其功能损失影响范围也将随震级的增大而增加。

(2) 随着地震烈度的增加,生命线工程破坏愈发严重。在烈度Ⅸ度及以上地区,对于供电和通讯系统,由于一些站点和核心设施的破坏,其功能将受到显著影响;而对于交通系统,由于山体滑坡、泥石流等地质灾害的出现将严重影响交通系统的通行;而对于供水、燃气管网,由于其埋置于地下,大面积的破坏和功能影响也都出现

在Ⅸ度及以上烈度区。

(3) 生命线系统功能恢复与灾害程度和灾区范围密切相关,一般来说,轻灾区比重灾区的恢复时间短得多;灾害范围越广,恢复时间越长(指发生同一烈度地震造成的破坏程度相当时)。

(4) 同一次地震,就生命线系统功能的恢复时间来看,供电系统恢复得最快,通讯系统与供电系统大体相当,交通系统恢复时间相对居于中间,供水系统相对较慢,而供气系统恢复得最慢。

(5) 在低烈度(Ⅵ度及以下烈度)区域,供电系统和通讯系统在没有出现设施破坏时,也可能出现短暂停电和通讯中断等现象,通讯系统中发生这种情况尤为明显。

鉴于生命线系统自身的特点和重要性,在震后应急和救灾中,必须优先考虑其功能恢复。各生命线系统的恢复模式主要取决于各系统震害特点和影响程度。基于此,研究不同生命线系统的恢复模式,建立各系统的功能恢复函数,可很好地评估震后各生命线系统的功能影响,从而能较为准确地评估由此产生的损失和影响。

## 2 生命线系统功能恢复函数

本文基于日本学者栗林荣一给出的1978年宫城县近海地震时主要生命线系统功能恢复的实例(Kazuhiko, Takashi, 1990),对其数据重新分析处理后,给出了供电、通讯、供水、燃气系统功能失效率随时间的关系;同时对日本的阪神大地震生命线系统的恢复时序关系(中国赴日地震考察团,1995)做了详细的统计。需要说明的是,本文在对原始数据进行处理时,将由原始数据中得到的震后初始功能失效率定义为无量纲的量,为1。随着系统功能逐步恢复,渐渐恢复到震前水平。当功能达到震前水平,即全部恢复时,则定义为0。

由于生命线系统功能在城乡经济社会日常生活中的重要性,相比于其他系统,震后总是优先考虑其恢复,而且要求其恢复时间比其它系统要迅速。历史震害表明生命线系统功能从地震后的功能初始失效后恢复到震前水平是一个渐进的、

<sup>①</sup> 中国地震局汶川地震现场应急工作队. 2008. 2008年5月12日四川汶川8.0级地震灾害损失评估报告.

逐步恢复的过程。功能恢复是一个随时间变化的函数，且这个过程很难用一条直线来模拟。鉴于生命线的网络化特征，在系统恢复时，可能由于系统中某些节点的修复，而使其功能大大恢复，也就是说这种关系将是一种指数关系。

基于 2 次日本地震的供电、通讯、供水、燃气系统的恢复时序关系，采用数学拟合方式给出了上述 4 类生命线系统的功能恢复函数表达式为：

$$y = \exp(-\frac{1}{A}x) \tag{1}$$

式中： $y$  为生命线系统功能失效率与初始最大功能失效率的比值； $x$  为震后恢复时间，以 d 为单位，从地震当天开始算起； $A$  是一个反映该生命线系统

重要程度、修复难易程度及震后应急决策修复措施有效性的综合变量，决定该生命线系统功能的恢复快慢，将其定义为生命线系统恢复函数衰减指数。

按上述方法分别给出了基于宫城县近海地震和阪神地震的 4 类重要生命线系统的恢复关系曲线，如图 1 所示。图中散点数据为通过震后统计得出的 2 次地震的系统功能恢复的原始数据，曲线为按式 (1) 得出的拟合曲线，其中，纵坐标为一个无量纲的量，其最大值 1 对应的是本次地震中该系统初始功能失效值，也就是地震后各生命线系统遭受到的最大影响；横坐标为功能恢复时间，0 为地震当天，对应功能初始失效的最大值。随着时间增加，功能逐渐恢复，功能失效逐渐减少。

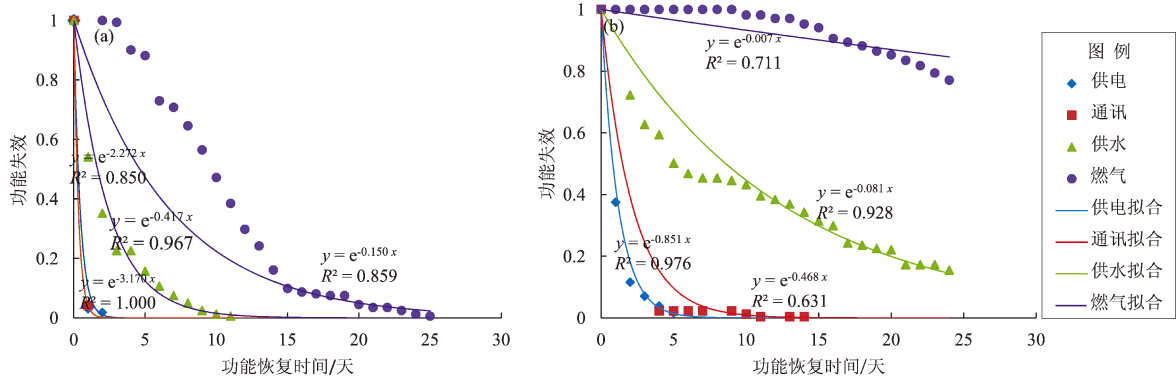


图 1 宫城近海地震 (a) 和阪神地震 (b) 生命线系统功能恢复及指数拟合图

Fig. 1 Function recovery and index fitting diagram of lifeline system in the Great Hanshin earthquake (a) and Miyagi earthquake (b)

从图 1 可以看出，这 2 次地震的拟合曲线与原始数据拟合较好，表明使用本文给出的生命线系统功能指数型恢复函数对评估生命线系统震后功能失效造成的损失是可行的。

经进一步的统计分析，2 次地震按照公式 (1) 得出的拟合参数  $A$  见表 1，表中  $R^2$  为拟合曲线的均方差。

由表 1 可知，通讯系统和供电系统的恢复速度基本上属于同一量级， $A$  为 0.2~5；供水系统的恢复则较为困难， $A$  为 2~15；燃气系统恢复最慢， $A$  为 5~150。从图 1b 中还可以看出，由于阪神地震燃气系统的实际功能失效率恢复曲线的衰减指数较大，具体形状与直线下降的拟合结果较为一致。

在震后的实际评估和预测中，可以参考初始

表 1 2 次地震中函数拟合参数表				
Tab. 1 Function fitting parameters of the two earthquakes				
地震事件	系统分类	$A$	$1/A$	$R^2$
宫城近海地震	通讯系统	0.32	3.170	1
	供电系统	0.44	2.272	0.850
	供水系统	2.40	0.417	0.967
	燃气系统	6.67	0.150	0.859
阪神地震	通讯系统	1.18	0.851	0.976
	供电系统	2.14	0.468	0.631
	供水系统	12.35	0.081	0.928
	燃气系统	142.86	0.007	0.711

损失，结合当地生命线系统的各部件的重要性、恢复难易程度以及当地生命线系统及应急对策等具体情况，给出一个合理的衰减指数  $A$ ，即可采用

式 (1) 快速得到各生命线系统的初始功能损失评估结果。

结合我国生命线系统震害和功能恢复特征, 本文给出衰减指数  $A$  的取值原则: ①对于同一生命线系统, 震害越轻, 则  $A$  取值越小; 震害越重,  $A$  取值越大; ②在同等烈度下, 灾害范围越广, 取值越大; ③当供电系统电厂或者大型变电站、通讯系统中心站点建筑和设施、供水系统水处理系统、燃气系统门站等出现毁坏时,  $A$  应取上述建议值的上限。

### 3 实例验证

为了验证 4 类生命线系统功能恢复函数的正确性, 本文以 1976 年唐山大地震后通讯、供电、供水系统和 2008 年汶川地震后绵阳市燃气系统的实际震后恢复时间为例, 将按本文方法计算得到的 4 类生命线系统震后恢复时间与实际恢复时间进行了对比。

1976 年 7 月 28 日, 唐山 7.8 级地震发生后, 唐山地区的生活线系统几乎全部瘫痪 (杨文忠, 2006), 地震后通讯、供电、供水系统的恢复情况如下所述:

(1) 通讯系统。按照先沟通后恢复, 先干线后支线, 先保证重点后逐步扩大的原则进行, 9 月初, 通讯初步恢复。

(2) 供电系统。利用京、津、唐电网先供电后发电, 先简易供电后健全。8 月 6 日, 地震破坏的 8 个 110 kV 变电站有 7 个恢复供电, 55 个 35 kV 变电所恢复供电 24 个。8 月中旬唐山电厂开始并网发电。

(3) 供水系统。以尽快恢复供水能力的原则, 首先解决饮用水, 然后分区抢修管网、设备, 用机泵统一调度, 恢复多水源统一管网供水。10 月初, 恢复水源 31 处, 平均日供水量 5.2 万吨, 饮用水与生产用水基本解决。

2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震后, 绵阳地区遭受严重破坏, 根据震后对绵阳地区燃气系统调查 (郭恩栋等, 2012) 显示, 绵阳市燃气震前日供气量 22.8 万  $\text{m}^3$ , 供气压力为 0.25 MPa。地震发生后立即停止供气, 24 小时后供气量为 11.6 万  $\text{m}^3$ , 全部恢复正常供气是在 60 d 以后, 日供气量

约为 22 万  $\text{m}^3$ , 但供气压力为 0.20 MPa。

考虑到唐山大地震和汶川地震震级大, 生命线系统破坏程度和功能丧失程度大, 波及和影响范围广, 在这种极端情况下, 本文对唐山地震中通讯系统和供电系统  $A$  取 5, 供水供水系统  $A$  取 15, 汶川地震中绵阳宏观地震烈度为 IX, 燃气系统  $A$  取 30。考虑各系统的恢复程度不同, 得出各生命线系统基本恢复时间, 见表 2。从表中可以看出, 计算得出的唐山大地震中 3 个系统的震后恢复时间与实际恢复时间基本一致; 汶川地震绵阳市的燃气供气量从 11.6 万  $\text{m}^3$  到 22 万  $\text{m}^3$  的计算时间和实际恢复时间也较为一致, 验证了本文方法的有效性和实用性。

表 2 与实际震害生命线系统恢复时间对比

Tab. 2 Comparison of lifeline system recovery time with actual earthquake damages

地震	生命线系统	实际恢复时间	计算恢复时间
唐山地震	通讯系统	约 32 d	约 40 d
	供电系统	约 18 d	约 25 d
	供水系统	约 62 d	约 70 d
汶川地震 (绵阳市)	燃气系统	60 d 以上	约 75 d

### 4 结论

本文考虑了生命线系统自身及其震害与功能失效的特点, 基于日本宫城地震和阪神地震的生命线系统震后恢复时序统计数据, 采用本文建立的生命线系统功能恢复函数, 并通过拟合的方式, 确定了供电、通讯、供水和燃气 4 大系统的指数形式恢复函数中重要的参数——恢复函数衰减指数  $A$ 。

由于国内目前还没有详细的生命线系统功能随时间不断恢复的详细调查数据, 选择日本地震后详细的生命线功能恢复时序进行拟合, 为了得到不同生命线系统的恢复模型, 从而得到的衰减指数  $A$ , 更多的是一个反映不同生命线系统恢复特征的变量。因此, 衰减指数  $A$  对我国震后生命线系统恢复预测有一定的借鉴意义。基于国内震后生命线系统的震害和功能恢复特点, 分析给出了详细的取值区间及取值原则, 为我国评估由生命线系统破坏造成的功能损失及恢复过程提供了可行的评估方法。选取唐山大地震震后供电、通讯、

供水和汶川地震绵阳市燃气系统的实际恢复时间,与本文方法计算得到的恢复时间进行对比,结果表明,该方法基本可行,由此验证了本文所建立的4类生命线系统震后功能恢复函数能够较为准确地评估各生命线系统的功能恢复模式,从而可作为为进一步评估由此产生的影响和损失的基础。

本文提供的方法是对生命线系统震后恢复过程的初步探讨,由于生命线系统的复杂性和不同地区同一类生命线系统的差异等原因,该方法还需要更为丰富的震害资料的支持,开展进一步的深入研究。为了更好地选择A,就需要在以后震后调查或者科学考察中,收集相关生命线破坏、恢复措施、功能恢复等详细数据,从而得到更为准确的A。因此,建议在今后震害调查中,专门开展针对生命线系统震后功能破坏情况及恢复情况的专项调查,并且,应由地震部门和相关专业管理人员参与震后调查,收集更为有效、详细的数据。

## 参考文献:

- 郭恩栋,王祥建,张丽娜,等. 2012. 生命线网络震害[R]. 中国地震局工程力学研究所研究报告.
- 刘金龙,林均岐,刘如山,等. 2013. 芦山7.0级地震通讯系统震害调查分析[J]. 世界地震工程,29(4):52-58.
- 刘如山,刘金龙,颜冬启,等. 2013. 芦山7.0级地震电力设施震害调查分析[J]. 自然灾害学报,22(5):83-90.
- 杨文忠. 2006. 在唐山地震中生命线系统的破坏及其恢复[J]. 地震工程与工程振动,26(3):184-185.
- 叶飞,郭恩栋,刘金龙,等. 2013a. 芦山7.0级地震燃气系统震害分析[J]. 自然灾害学报,22(5):77-82.
- 叶飞,郭恩栋,刘金龙,等. 2013b. 芦山地震供水系统震害调查分析[J]. 自然灾害学报,22(4):91-97.
- 中国赴日地震考察团. 1995. 日本阪神大地震考察[M]. 北京:地震出版社.
- 钟江荣. 2001. 城市地震经济损失预测研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- Kazuhiko K, Takashi K. 1990. Evaluation of indirect economic effects caused by the 1983 Nihonkai - chubu, Japan, earthquake[J]. Earthquake Spectra,6(4):739-756.

# Preliminary Study on Post - earthquake Functional Recovery Model of Lifeline Systems

ZHONG Jiangrong, ZHANG Lingxin

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

## Abstract

A preliminary study on the function restoration of lifeline systems including electricity, communication, water and gas was made after earthquake in this paper. Considering the lack of investigation datum on the function recovery of the lifelines with the time in China, an exponential form of the post - earthquake function recovery function which combined with the characteristics of the lifelines system itself was established based on the survey datum on the function recovery of the four lifelines system (the power supply, communication, water supply and gas supply) in the Miyagi earthquake and the Great Hanshin earthquake occurred in Japan. A function recovery attenuation index that reflects the important degree of the lifeline system, the degree of difficulty in repairing and the effectiveness of the post - earthquake emergency decision repair measures was defined in the function. The value interval and selecting principle of the attenuation index of four systems were preliminarily limited on the basis of summarizing the earthquake damage characteristics of lifeline systems in China. In addition, the actual recovery time of power supply, communication, water supply after the Tangshan earthquake and gas supply in the Mianyang city after the Wenchuan earthquake was compared with calculation of the function recovery function. The two groups of data were in good agreement, indicating the lifeline recovery function that developed in this study is effective.

**Keywords:** lifeline system; function recovery function; a attenuation index of recovery function; function failure; earthquake loss