

基于典型生命线工程震害 评定地震烈度的研究

孙 路◎著

JIYUDIANXING
SHENGMINGXIAN
GONGCHENGZHENHAI
PINGDING DIZHEN LIEDU DE YANJIU



九州出版社
JIUZHOU PRESS

基于典型生命线工程震害 评定地震烈度的研究

孙 路◎著

JIYUDIANXING SHENGMINGXIAN GONGCHENGZHENHAI
PINGDING DIZHEN LIEDU DE YANJIU



九州出版社
JIUZHOU PRESS

图书在版编目 (C I P) 数据

基于典型生命线工程震害评定地震烈度的研究 / 孙路著. — 北京 : 九州出版社, 2016. 7

ISBN 978-7-5108-4536-9

I. ①基… II. ①孙… III. ①工程地震—地震烈度—评定—研究 IV. ①P315.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 156791 号

基于典型生命线工程震害评定地震烈度的研究

作 者	孙 路 著
出版发行	九州出版社
地 址	北京市西城区阜外大街甲 35 号 (100037)
发行电话	(010) 68992190/3/5/6
网 址	www.jiuzhoupress.com
电子信箱	jiuzhou@jiuzhoupress.com
印 刷	北京市媛明印刷厂
开 本	185 毫米×260 毫米 16 开
印 张	12.25
字 数	250 千字
版 次	2016 年 8 月第 1 版
印 次	2016 年 8 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5108-4536-9
定 价	38.00 元

内容简介

目前《中国地震烈度表》（2008）对地震烈度的评定，依靠人的感觉、房屋震害、其他震害现象及水平地震动参数等指标。随着社会的发展、生命线地震工程研究的深入，在震后依据现行地震烈度表判定某地区的烈度时，存在一些不足之处。在这种背景条件下，考虑在地震烈度表中引入一些典型的生命线工程指标，用于辅助地震区地震烈度的评定，有一定的社会需求。本书以生命线工程地震烈度评定为研究的切入点，选择系统中典型结构物或设备进行地震烈度的评定，主要工作内容及成果如下：

1.对我国破坏性地震中典型桥梁震害进行了详细的分析，按照桥梁的结构形式、地震烈度、破坏部位、破坏部位的数量、桥梁的破坏等级、是否发生间接震害等分类整理汇总。根据现有桥梁的占有量，选择两类主要的桥梁类型——梁式桥和拱桥作为研究对象，以地震烈度为基本分类依据，寻找梁式桥和拱桥宏观震害与地震烈度间的关系。经统计分析，得到各烈度下梁式桥和拱桥出现各种震害的概率；得到各烈度下梁式桥和拱桥在完好、轻微、中等、严重和毁坏等5种破坏等级下出现的概率；得到各破坏等级下桥梁不同部位出现震害的概率；得到在各烈度下桥梁出现破坏部位种类的概率。将统计得到的概率简化，采用“个别、少数、多数、绝大多数”等不定量数词对各种震害或破坏等级进行限定，依据桥梁的破坏等级和破坏部位两种震害方式评价地震烈度，给出基于桥梁震害评定地震烈度的建议指标。该建议指标与现行地震烈度表模式相近，不定量数词范围定义一致，为地震烈度表中引入生命线工程的评价指标提供参考。

2.对我国破坏性地震中的变电站内的电力设备进行了广泛而细致的震害分析，总结电力设备的自身结构形状及材料构成的特点，通过比较和综合归纳、统计分析，对变电站中变压器本体移位、变压器套管、断路器、隔离开关、CT、PT和避雷器等设备宏观震害进行研究，按照不同烈度进行分类统计。得到各烈度下各类设备震害出现的概率；判断各变电站的破坏等级，并得到各烈度下变电站出现完好、轻微、中等、严重和毁坏等5种破坏等级的概率；得到变电站各破坏等级下各设备出现震害的概率；得到各烈度下变电站内出现破坏设备种类的概率。将统计得到的概率简化，即采用“个别、少数、多数、绝大多数”等不定量数词对电力设备各种震害或变电站的破坏等级进行限定，依据变电站的破坏等级和电力设备震害两种方式评价地震烈度，给出依据电力设备震害评定地震烈度的建议指标。该建议指标与现行地震烈度表模式相近，不定量数词范围定义一致，为地震烈度表中引入生命线工程的评价指标提供参考。

3.对我国破坏性地震中的供水管道进行了广泛而细致的震害分析，对国内外供水管道震害进行分析，总结其震害特点和震害规律。由于供水管道在地震中的易损程度

较高，在Ⅵ度区庭院管道就可能发生破坏，且随地震烈度的增大，管道破坏也相应加重。此外，供水管道的震害受地震动参数、场地条件、管材特征、管材的设计、使用年限和施工质量等多种因素的影响，统计时很难给出精准的关系。本文从供水管道的区域平均破坏率和系统功能状态为切入点，对国内供水管道震害进行分析和统计，总结震害规律。选择单位长度内管道的破坏处数进行统计，得到各烈度下的供水管道破坏等级；总结各烈度下供水管线的震后水压、漏损率和功能失效时间以及系统功能恢复的难易程度，大范围内衡量了管道震害破坏程度。参考日本和前苏联地震烈度表中对管道的描述，结合震后供水管道的破坏等级和功能失效模式给出基于供水管道震害评定地震烈度的建议指标。

4.应用定性比较分析方法，找出各级地震烈度下，桥梁和电力设备中选定的震害之间的因果联系，确定各破坏同时出现的概率，相较于传统统计方法得到的“和/或”结论更为合理。这是定性比较分析方法在地震工程学领域的初次使用，为今后该方法在地震工程领域的应用奠定了一些基础。

本文研究给出的建议指标与现行地震烈度表模式相近，不定量数词范围定义一致，可为地震烈度表中引入生命线工程的评定指标提供参考。

序

“生命线工程”(lifeline engineering)主要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,主要包括供水、排水系统的工程;电力、燃气及石油管线等能源供给系统的工程;电话和广播电视等情报通信系统的工程;大型医疗系统的工程以及公路、铁路等交通系统的工程等。生命线工程抗震研究是工程防灾研究的重要分支之一。目前,我国《中国地震烈度表》(2008)对地震烈度的评定,主要依靠人的感觉、房屋震害、其他震害现象及水平地震动参数等指标。随着社会的发展、生命线地震工程研究的深入,在震后依据现行地震烈度表判定某地区的烈度时,存在一些不足。在这种背景条件下,作者考虑在地震烈度表中引入一些典型的生命线工程指标并进行相应的研究工作,研究成果用于辅助地震区地震烈度的评定,有一定的社会需求和实际意义。

本书以生命线工程系统中典型结构物或设备进行地震烈度的评定为切入点,结合现有震害数据,将交通系统中的桥梁、电力系统中变电站内的电力设备和供水系统中的供水管道作为地震烈度判定的指标,开展了一些研究工作。调查分析了海城地震、唐山地震和汶川地震中生命线工程的灾害记录、科学考察报告,借鉴我国 30 多年的地震灾害损失评估资料,研究生命线工程震害的典型模式,剔除不合理数据及异常值,建立了各类破坏现象与一些参数(比如设备类型、桥梁类型、管型、土壤条件、接头情况等)之间的统计关系。

书中对国内破坏性地震中典型桥梁震害进行了广泛详细的分析,按照桥梁的结构形式、地震烈度、破坏部位、破坏部位的数量、桥梁的破坏等级、是否发生间接震害等,进行分类整理、汇总。参考现行规范,采用“个别、少数、多数、绝大多数”等不定量数词将统计得到的概率简化,对各种桥梁震害或破坏等级进行限定,采用桥梁破坏等级和破坏部位两种震害方式评价地震烈度,给出基于桥梁震害评定地震烈度的建议指标。对国内破坏性地震中的变电站和站内的电力设备进行了广泛而细致的震害分析,总结电力设备的自身结构形状及材料构成的特点,通过比较和综合归纳、统计分析,将变电站中变压器本体移位、变压器套管、断路器、隔离开关、CT、PT 和避雷器等设备宏观震害作为分析对象,按照不同烈度进行分类统计。采用“个别、少数、多数、绝大多数”等不定量数词将统计得到的概率简化,对电力设备各种震害或变电站的破坏等级进行限定,依据变电站的破坏等级和电力设备震害两种方式评价地震烈度,给出基于电力设备震害评定地震烈度的建议指标。由于供水管道在地震中的易损程度较高,在Ⅵ度区庭院管道就可能发生破坏,且随地震烈度的增大,管道破坏也相应加重。此外,供水管道的震害受地震动参数、场地条件、管材特征、管材的设计、使用年限和施工质量等多种因素的影响,统计时很难给出精准的关系。书中从供水管道的区域平均破坏率和系统功能状态为切入点,对国内供水管道震害进行宏观统计,总结震害规律。选择了单位长度内

管道的破坏处数进行统计，得到各烈度下的供水管道破坏等级；总结各烈度下供水管线的震后水压、漏损率和功能失效时间以及系统功能恢复的难以程度，大范围内衡量了管道震害破坏程度。参考日本和前苏联地震烈度表中对管道的描述，结合震后供水管道的破坏等级和功能失效模式给出基于供水管道震害评定地震烈度的建议指标。

此外，作者应用应用定性比较分析方法 (Qualitative Comparative Analysis)，用于完善统计分析方法得到的研究结论。定性比较分析方法是一种案例分析的方法，它最早由拉金在 1987 年提出，最初被应用于社会科学领域中，近些年在管理学科中悄然兴起。定性比较分析方法在国外研究领域的应用已相当广泛，但在我国却仍然是一新鲜事物，提及 QCA 方法的学术论文仅有十余篇，分属社会科学和管理科学领域。定性比较分析方法在地震工程领域尚无应用，本书进行了初步探索性研究，为该方法在地震工程领域的应用奠定一些基础，提出依据桥梁结构破坏、电气设备破坏评定地震烈度的初步参考指标，为今后地震烈度表的进一步完善提供基础性研究数据。

本书的研究工作是在哈尔滨学院青年博士科研启动基金项目 (HUDF2016—010)、国家科技支撑计划 (编号: 2015BAK17B05)、中国地震局工程力学研究所中央级公益性研究所基本科研业务费专项 (编号: 2014A01) 等基金资助下完成的。在此代表作者，感谢中国地震局工程力学研究所生命线工程教研室全体研究员的大力支持和意见，感谢聂高众、姜立新、刘如山、帅向华研究员对书稿的审阅并提出的宝贵修改意见。

中国地震局工程力学研究所研究员、博士生导师

林均岐

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 课题的背景及意义	1
1.2 典型地震中的生命线工程震害	3
1.3 地震烈度表的研究历史及现状	5
1.4 生命线工程的研究发展及在烈度表中的应用	8
1.5 研究方案设计	13
第二章 基于桥梁震害评定地震烈度的研究	15
2.1 国外地震中的桥梁震害	15
2.2 国内地震中的桥梁震害	17
2.3 桥梁震害分类	39
2.4 桥梁震害统计分析	44
2.5 基于桥梁震害评定地震烈度的指标	61
2.6 本章小结	63
第三章 基于电力设备震害评定地震烈度的研究	65
3.1 国外电力系统的典型震害	65
3.2 国内电力系统的典型震害	66
3.3 电力设备震害特点	79
3.4 电力设备震害统计分析	80
3.5 电力设备震害评定地震烈度的初步指标	91
3.6 本章小结	92
第四章 基于供水管道震害评定地震烈度的研究	93
4.1 国外供水管道震害分析	93
4.2 国内供水管道震害分析	97
4.3 供水管道的破坏形式	119
4.4 影响供水管道破坏的因素	121

4.5	供水管道震害统计分析·····	124
4.6	基于供水管道震害评定地震烈度的指标·····	127
4.7	本章小结·····	127
第五章	基于定性比较分析方法的生命线工程震害评定地震烈度的研究·····	129
5.1	定性比较分析方法简介·····	129
5.2	采用定性比较分析方法的可行性分析·····	130
5.3	事实表的构建·····	130
5.4	本章小结·····	139
第六章	结论与展望·····	141
6.1	全文总结·····	141
6.2	未来展望·····	142
附 录	·····	145
参考文献	·····	179

第一章 绪 论

1.1 课题的背景及意义

1.1.1 课题的背景

中国位于世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带之间,受板块间挤压作用,地震活动频繁。全国约有 41% 的国土、50% 的城市、70% 的百万人口大中型城市,都处于Ⅶ度及Ⅶ度以上的高烈度地震区。除浙江和香港特别行政区以外,其他省、直辖市、自治区近百年已发生 600 余次 6 级以上地震。强烈地震下,大量人员伤亡,结构物、构筑物 and 生命线工程系统严重损伤、毁坏,地形地貌发生巨大改变。随着生命线工程系统与人们生活联系的日益紧密,强烈地震也给这个相对年轻的系统带来了巨大的灾害。

生命线工程是由几大类系统构成,每个系统由不同的结构物、工程设施和设备组成,系统之间相互联系、相互影响。生命线工程系统在地震作用下一旦遭到破坏,整个社会的生产、生活都将受到严重的影响,人们日常活动因社会服务功能的中断而出现局部乃至全局瘫痪,引发次生水灾、火灾、有毒物质泄漏和疾病流行,会严重影响人类社会的正常运转。生命线工程系统的历史震害资料体现,系统中的结构或设施在地震作用下易损性较高,如桥梁、电力设备和供水管道等,当地震烈度处于Ⅶ度甚至Ⅵ度就可能发生破坏,地震作用反应十分敏感。生命线工程的破坏具有多重性、网络性、间接性和广泛性等特点,且因为系统破坏容易带来严重的次生灾害,因此,应适当提高生命线工程的抗震设防等级,并且要尽量减轻生命线工程在破坏性地震中的受损程度。对于生命线工程所承担的震后抢险救灾服务、后勤保障等重大责任,震后快速评定其受损程度、快速抢修受损的生命线工程、快速恢复其系统功能,对减轻地震灾害及损失具有重要意义。

地震烈度是地震引起的地面震动及其影响的强弱程度,是人们最容易接受的地震作用影响的直观反映。地震发生后,政府和普通民众最想获知的就是地震的震级及其烈度,由地震烈度可以粗略地了解这一地区可能产生的人员伤亡、经济损失和破坏程度。目前,我国现行地震烈度表中关于地震烈度的评定,主要依靠人的感觉、房屋震害和其他震害现象及水平地震动参数,其他震害现象包括悬挂物、家具、烟囱及地质地貌等。随着社会的发展,应用现行地震烈度表评定地震烈度,存在下面的这些问题:

- 1.各类型建筑在各地区的占有量不同,不同省份、不同人文风俗环境建筑物的类型上存在差异,导致利用房屋结构震害评定地震烈度存在差异。

- 2.房屋种类随着社会的发展,不断推陈出新,结构形式不断变换,对烈度表中划分的 3 类建筑已逐渐不能一一对应,地震烈度评定时存在差异;且一些房屋设防等级高、

质量好,在地震作用下不易发生破坏,在区域地震烈度评定时,存在评定困难。

3.野外或人烟稀少地区,缺少一定规模的房屋建筑群和人类居住点,无法合理地评定地震烈度。

4.水平地震动参数作为评定烈度的参考指标,存在离散性大的特点,无法从根本上解决烈度评定的问题。

在这种背景条件下,研究者试图扩充地震烈度表中的评价指标,考虑在地震烈度表中引入一些典型的生命线工程震害指标,用于辅助地震区地震烈度的评定。根据生命线工程所涉及的一些工程结构和基础设施,结合生命线工程的特点,考虑在地震烈度表中引入生命线工程指标用于地震烈度的评定工作。这是基于以下几方面的考虑:

1.生命线工程系统中某一系统的结构形式或选用设备在全国范围内大同小异,变化种类少,如交通系统、电力系统、供水供气供热系统。

2.各系统分布区域广泛,在一些野外及人烟稀少地区,也会出现一些道路、供水管道、输电线路等生命线工程涉及的基础设施,方便地震烈度的评定。

3.部分生命线工程结构,地震作用反应敏感,如桥梁、电力设备和供水管道在地震烈度Ⅶ度甚至Ⅵ度情况下就可能发生破坏,可以有效地判定地震烈度等级。

4.随着社会对生命线工程系统重要性的认识和研究,以及近几十年来地震应急救援和震后的科学考察获取的大量丰富的震害资料,特别是汶川地震中,生命线工程破坏资料非常丰富,为地震烈度的研究提供了大量的基础数据,这些数据为在地震烈度表中补充一些生命线工程的指标提供了必要的基础材料。

1.1.2 研究的意义

我国经历了海城地震、唐山地震及汶川大地震带来的巨大伤害和经验教训,进行震前的抗震设防、提高结构物或基础设施的抗震水平是抗震研究亟待解决的问题。地震烈度评定是一切抗震工作的基础,结构进行抗震设防的标准是依据烈度来制定的。鉴于我国在地震烈度表中没有将生命线工程指标列入评定地震烈度表,因此将生命线工程指标评定地震烈度纳入相关的标准,具有十分重要的科学意义和应用价值。

目前,我国现行地震烈度表采用以房屋和人的感觉为主的评价指标,而其他工程结构仅是地震烈度评定的辅助标准。随时代的发展、社会的进步及对生命线系统工程的深入研究,越来越多的生命线工程结构在地震中表现出的自身特点,将生命线结构工程中的典型构件或设备的震害作为评定地震烈度的指标是可行的。本文以生命线工程震害评定地震烈度为研究切入点,通过生命线工程系统中的典型结构物或设备的震害评定地震烈度。采用统计分析、回归分析和定性比较分析等方法从不同方面、不同角度对生命线工程地震破坏进行深入分析,获取的研究成果将为我国地震烈度表的进一步修订提供科学依据。

1.2 典型地震中的生命线工程震害

强烈地震对生命线工程的破坏是巨大的,生命线工程系统的社会服务功能会在强烈地震后受到极大损害乃至彻底丧失。在一些系统中,个别元件或设备的破坏,可能引起部分区域甚至整个区域的系统功能发生大幅度的损坏。在国内外地震中,生命线工程系统受地震作用影响破坏导致其服务功能严重丧失的震害众多。

1.1975 年海城地震 (M7.3 级)

1975 年 2 月 4 日海城 7.3 级地震,生命线系统遭到了严重破坏。由于这一带历史上强烈地震的记载不明,桥梁设计从未考虑过抗震设防,多数桥梁遭到不同程度的破坏,灾害波及海城、大石桥、营口、盘锦、盖县、鞍山、辽阳、辽中等市县。特别是地震区的西部,由于地处滨海冲积平原,覆盖土层厚、地下水位高,桥梁灾害比较普遍。地震对供水系统的震害在东部丘陵地区较轻,西部平原地区较为严重,直接埋设的地下管道遭到折断、接口拉开、管体破裂等不同程度的破坏,供水管网大量漏水,系统功能严重受损,水压、水量无法保证,部分地区震后供水中断。例如,海城镇,由于管道年代久远,自然腐蚀严重,在地震烈度 IX 度情况下,破坏率达到 10 处/km;营口市,160 千米的供水管道,发生 372 处损坏,平均破坏率 2.35 处/km。因为海城地震发生在人口居住密集、工业发达的地区,强烈地震后的一段时间内,因给排水工程遭到重创,严重影响了工农业的生产、人们的生活和消防救火,加剧了次生灾害。在震后 25 天时间里,共发生火灾 1090 次,在给水管网严重破坏情况下,灭火困难,损失巨大。电力系统中的多个火力发电厂、80 多个变电所和 100 多个输配电线路受到了强烈地震的影响,电力设施发生不同程度的震害,间接致使人们日常生活、交通运输、企业生产和城市供水系统受到影响,主要震害有:由于变压器重瓦斯继电器保护误动作,引起了 8 个 220 千伏一次变电所跳闸,5 个发电厂内 11 台机组降低出力或停机,对电网冲击很大;营口地区电网有 33 条输电线路和 75 条配电线路相继跳闸,营口变电所主变压器也同时跳闸,由于蓄电池损坏,无续电保护运行 19 小时 40 分钟,这次强烈地震,震坏或影响了大量的电力设备。

2.1976 年唐山地震 (M7.8 级)

1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震,地震造成的生命线系统破坏涉及范围广、破坏系统多,其中电力、供水、通信和交通系统破坏造成的后果最为严重。由于电厂无抗震设防,倒塌致使电力系统中断,引起唐山煤矿地下通道中的排水设施停止工作,地下通道全部被淹,完全损毁,因地震的次生灾害而造成停产数月。通讯设施、电力系统中断,导致唐山市和外界失去联系,河北省政府和中央政府不能及时获取灾情信息,无法及时采取应急救援措施。交通系统中的桥梁倒塌破坏,造成通达唐山市的交通线路中断,蓟运河大桥、滦河大桥是唐山市的门户,蓟运河大桥的倒塌使京津方向难以及时支援,滦河大桥倒塌延误了东北的救援人员和物资进入唐山市。供水系统中,唐山市地下供水系统总长为 140 千米,地震以后,有 646 处遭到了破坏,平均破坏 4.61 处/km,最严重的

区域破坏率达到 28.4 处/km，市区供水管网平均破坏率达 4 处/km，破坏严重，漏损率严重，震后整个供水系统功能丧失。震后约 1 周时间内无法供水，居民只能靠蓄水池、洼坑积水、养鱼塘、游泳池内存水作为生活用水，同时还给医疗抢救工作带来极大困难。由于供水管网和排水管网系统均遭严重破坏，污水横流导致严重污染，影响供水水质。

3.1985 年墨西哥地震（M7.8 级）

1985 年 9 月 19 日墨西哥城 7.8 级地震，导致城市供水和煤气管网遭受大面积的破坏。供水管网干线破坏 800 多处，煤气管网因地震作用和管内压力变化，致使管道破坏 400 多处。煤气管道的断裂，引发煤气爆炸，发生多处火灾，且由于供水管网的破坏，致使救火受到严重阻碍，引发了更为严重的次生灾害。

4.1989 年美国洛马普列塔地震（M7.2 级）

1989 年 10 月 17 日美国洛马普列塔 7.2 级地震，交通系统、电力系统和供水系统遭受了严重破坏，旧金山和奥克兰多之间的双层海湾大桥的桥面震垮掉落，致 40 多人死亡，每周的损失约百万美元；高压变电站（230KV 和 500KV）受损严重，导致 140 万户居民断电；旧金山市内的供水系统干线、支线上，有 350 处需要修复更换，由于供水管网系统的功能失效，也延缓了次生火灾的扑救。

5.1994 年美国 Northridge 地震（M6.8 级）

1994 年 1 月 17 日美国 6.8 级 Northridge 地震，交通系统、电力系统和供水系统同样遭受了不同程度的严重破坏。桥梁结构的严重受损，致使部分交通系统出现瘫痪；电力系统的高压变电站（230kV 和 500kV），受地基土场地液化的影响，高压输电塔出现倾倒或损坏现象，导致数百万居民短时失去供电；供水系统，洛杉矶市内的主干线 100 多处破坏，1400 处支线需要修复。

6.1995 年日本阪神大地震（M7.2 级）

1995 年 1 月 17 日日本阪神 7.2 级地震，此次地震后对生命线工程系统的震害进行了详细的记录。交通系统损失严重，多座高架桥倒塌或部分倒塌，6 条铁路线遭受严重破坏，出现短暂的停止通行，交通系统功能丧失；阪神高速神户线段内，共 1192 个桥墩有 611 个遭到破坏，破坏率高达 52%，且部分桥墩损坏严重，有 150 个已经无法修复，需重建，整体重建率高达 13%。供电系统功能受损，百万用户短时断电。供水系统，输配水管道损坏严重，神户市周围城市断水率高达 70% 以上，芦屋市和伊丹市在震后一段时间内完全断水，停水又致使火灾无法顺利扑灭，引发的次生灾害更加严重。

7.2008 年四川汶川地震（M8.0 级）

2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震，震源深度 14 千米，最高烈度达 XI 度。交通系统基础设施破坏严重，路面开裂、路基沉陷、挡土墙破损；地震引发的崩塌、滑坡和泥石流等间接地震灾害更使得整个交通系统损失严重。供水系统损毁严重，在四川省境内，有 20 多个市县的供水系统遭到破坏。成都、绵阳和广元三个城市，处于低烈度区，虽然供水系统受到地震作用的影响，但经震后抢修，城市的供水管网能快速恢复正常使

用功能；在都江堰、绵竹等城市，供水管网遭到严重的破坏，震后短时期难以恢复，供水系统损失严重，管网漏失率大，水压达不到规定的要求；北川县城和绵竹汉旺镇等地区，乡镇供水设施近乎全部被摧毁，居民饮用水依靠空投矿泉水、瓶装水进行维持。供电系统损失严重，四川区域内的 16 个地区（市、州）、60 个县受灾，共有 400 多万居民供电受到影响，成都的彭州市、都江堰市，德阳的绵竹市、什邡市、中江县，绵阳的北川县、江油县、安县，广元的剑阁县、青川县等县市的电网受损尤为严重。

1.3 地震烈度表的研究历史及现状

地震烈度与地震烈度表同时诞生，源于 1564 年意大利地图绘制者 J.Gastaldi 利用各种色彩在地图上表示 Maritime Alps 地震作用的影响及震害程度不同的地区，这是地震烈度最初的概念和烈度分布图的雏形。此后，人们借鉴并改进了他的做法，规定了评定烈度的宏观破坏现象及烈度评定方法，称之为地震烈度表。地震烈度表的编制和地震烈度的评定属地震工程研究初期的前沿领域，百年来人们对它们的研究一直在延续，以下将对地震烈度及地震烈度表的发展过程进行简要介绍。

1.3.1 地震烈度

地震烈度这一术语来自于英文单词 Intensity，最初用它来表示地震的强烈程度，逐步扩展到反映地震中某一地区人的感觉、结构物的损坏、器物的反应和自然现象的变化等宏观标志遭受地震影响的强弱程度。不同学者，对烈度作用的理解上侧重点不同，有的侧重于地震作用，有的侧重于地震作用的后果，有的则将二者兼顾。此外，学者更多地强调了烈度是一定的地点（或范围），我国在地震烈度评定时，在农村中将一个自然村作为一个单元，在城市将面积为一平方公里作为一个单元来评定地震烈度，所以地震烈度是对一定范围内地震作用或作用后果的整体描述。

地震烈度的直接含义就是地震引起后果严重程度的一种衡量尺度。地震烈度的第二种解释，是地震引起后果的严重程度，一般也反映了地震破坏作用的大小。所以，地震烈度也可以理解为地震破坏作用大小的一种量度。虽然第二种解释是地震烈度最初含义的衍生，但长久以来，研究人员多在这一含义上使用它。地震烈度概念在地震工程学的有关重要应用中都被理解为地震动强弱程度的度量尺度。地震烈度的两种理解含义的区别在于考虑问题的角度不同，因此应用的目的也不同。从地震工程学的角度，应当强调它的间接含义，把它作为地震动破坏作用的度量尺度，考虑评定烈度的标志中哪些能反映地震动强度，是评定烈度的主要标志。

地震烈度是一个极其重要的概念，它的突出特点就是“简单”，这在工程应用中极为重要，一个简单的概念却考虑了多种地震宏观后果。第一，在强震后短时期就能得到地震烈度，利用它表述地震影响程度、破坏的严重性和分布区域等，方便政府和人们的理解和接受，以便确定抗震抢险、救灾支援的规模。第二，地震活动性的研究几乎完全是通过地震烈度这个概念建立在历史地震震害资料基础之上的，我国在历史上，地震历

史记载可以追溯到两千年以前,因为仪器记录数据只有几十年的历史,对于地震活动研究来说过于短暂;而地震活动性是地震研究的核心问题,离开了它,工程地震危险性分析也就失去了立足点。第三,在世界上多数国家的地震活动性,包括我国在内,强震观测资料是很少的,还不能为建立地震动衰减的统计规律提供足够的数据;在这些国家或地区如何预测工程场地的设计地震动参数,也是当前工程地震研究的一个重要问题。显然,这些问题如何合理地解决都离不开地震烈度资料的应用。

在进行地震烈度评定时,要综合考虑多种因素,凭借地面震动测量、遥感解译、现场等方法确定,烈度相对震级具有不确定性并受主观判断的影响,且需要比震级测定长得多的时间,视震级和灾区范围不同,从数十小时到数天,甚至更长时间才能最终确定。如今,地震烈度评定是地震人员搜救、救灾资源调配、地震灾害损失评估、灾区恢复重建规划和地震成灾机理研究和抗震设防标准制定等方面工作的基础,因此,无论现在还是今后,对地震烈度的持续研究和发展,具有重要的科学意义和应用价值。

1.3.2 国外地震烈度表

地震烈度表的编制和地震烈度的评定有着百年的历史,属地震工程研究初期的前沿领域。世界上最早的地震烈度表诞生于 1564 年,此后陆续出现过 70 多个烈度表,从最初的为某一次地震而使用的烈度表,到目前统一适用于各国地震的烈度表;从最初的按照 4 度划分的地震烈度,到目前 7 度或 12 度划分的地震烈度,等级在逐步增多。目前,在世界上使用较为广泛的地震烈度表主要有:

1. 麦加利烈度表 (MM)

意大利人罗西于 1874—1878 年编制了麦加利地震烈度表,是世界上第一个能够在地震评定中应用的地震烈度表,该表在百年的历史过程中,经各领域多位专家的不断修订,成为当今的“修订的麦加利地震烈度 (Modified Mercalli Scale)”,现为美国、加拿大和拉丁美洲、香港等国家和地区使用。麦加利地震烈度表从感觉不到至全部损毁,全表共分 12 等级,Ⅴ 度或以上才会出现破坏。地震烈度的评定,依据地震时地面建筑受破坏的程度、地形地貌改变和人的感觉等宏观现象判定。

2. 前苏联烈度表 (OCT)

前苏联 1931—1952 年采用的地震烈度表 (OCT BKC—4537) 从常人不能察觉,只有仪器才能记录的地震动 (Ⅰ 度) 开始,到一切普通建筑物都不能避免破坏的大灾难 (Ⅺ 度) 为止,全表共分 12 等级,用以评定地震烈度。1952 年麦德维捷夫对此表进行了修订,将房屋和建筑物、地上存留的现象和潜水与地表水的情况变化和其他特征分三类,用 12 度的分类系统描述,该地震烈度表与 1931 年地震烈度表的区别在于:它在评定地震对建筑物的影响程度时,不是根据破坏情况,而是根据用一种叫作“地震计”的专门仪器所测得的弹性相对位移的数值。1952 年地震烈度表现为俄罗斯和一些东欧国家使用。

3.日本气象厅烈度表（JMA）

日本结合本国地震情况制定出的地震烈度表，与其他国家相比，有着显著的不同，在制订时不仅根据宏观地震现象进行定义，还将物理指标考虑在内，如地震时地面的最大水平加速度。1996 年日本气象厅首次对地震烈度重新修编，将原有的 7 等级烈度重新划分为 8 度，并将 5 度和 6 度区分为 lower 和 upper 两部分，因此该表的实际地震烈度为 10 度。新的地震烈度表修订了烈度的定义，将原来的文字说明改用烈度计测得的数值，不再沿用由身体感觉判定烈度的评价方法，并将 7 度直接用烈度计测量出来。该表描述了在不同烈度下人的反应、室内状况、室外状况，以及不同结构物、生命线工程设施、地基与坡面等呈现出的状态和现象。

4.欧洲烈度表（EMS98）

欧洲地震烈度表诞生于 1964 年，由 Medvedev、Sponheuer 和 Karnik 三人合作完成，经欧洲地震委员会审定，并在欧洲地区推荐使用，即 MSK—64 地震烈度表。欧洲地震委员会十分重视地震烈度的评定工作，1981 年启动对 MSK—64 的修订工作，经 5 年细致验证和校核，在 1986 年公布施行现欧洲地震烈度表的第一个版本。1992 年的欧洲地震委员会全体会议推荐 1992 年版本，并在其后的 3 年检验期内对其进行试用，在此期间，92 版本地震烈度表除了在欧洲范围内使用外，还被用于 1994 年的美国北岭地震和 1995 年的日本阪神地震。1998 年经试用期后的欧洲 92 版本完善成为欧洲 98 版本，即第二个版本。欧洲 98 版本地震烈度表（EMS—98），因其适用性、客观性和可操作性，已逐步成为烈度评定的国际标准。欧洲 98 版本地震烈度表中，对不同建筑结构类型的易损性进行了分类，并对建筑物破坏等级进行了划分，一些描述性语言也给出了定量描述，增加了烈度评定的客观性及可操作性。

这种以宏观现象为依据的分度方法，虽然具有宏观模糊性和间接性的缺点，但鉴于国内外目前使用的几种叙述性地震烈度表都以大量震害资料为基础而建立，具有一定的统计价值，因此，在足够震害资料的前提下，确定适合国情的烈度表用于评定地震烈度，是具有一定客观可靠性的。

1.3.3 中国地震烈度表的发展和现状

从二十世纪五十年代，我国开始进行地震烈度表的编写工作。第一版本的中国《新的地震烈度表》于 1956 年诞生，此后 50 多年间共经历了四次修编，目前国内使用的地震烈度表为《中国地震烈度表》（2008）版本。各版本的修订的情况如下。

1.谢毓寿根据我国地震记载的历史资料、震害、建筑风格特点，借鉴前苏联地震烈度表，编制了《新的中国地震烈度表》（1957），是我国地震烈度研究的里程碑。此表采取 12 等级划分，以房屋、结构物的破坏和地表现象为判定标准，并根据现有建筑特点，将房屋划分为三类，即“I 类房主要是土搁梁房，II 类房是简单屋架房，III 类房为正规屋架房”，这些房屋在当时我国农村是非常常见的结构类型；结构物主要包括“城墙、

围墙、庙宇、碑亭等一些古建筑”。该表还对地表破坏现象、器物的反应也进行了细致严格的规定和描述,如规定中高烈度区地裂缝的宽度和长度、中低烈度区瓶罐相碰水溢出情况的描述等。

2.刘恢先等人在《新的中国地震烈度表》的基础上编制了《中国地震烈度表 1980》,该表吸收海城地震、唐山地震、邢台地震、通海地震等 1960 年至 1980 年间地震烈度的评定经验,保留 12 等级的划分方式,以便于继承过去按旧表整理的地震资料。1980 地震烈度表,强调了地震烈度是一定范围平均地震破坏力的衡量尺度;在 1957 地震烈度表的基础上简化了宏观描述,将房屋类型由三大类转变为一类,即“一般量大面广的土木和砖木低层房屋”,并首次将震害指数作为评定房屋破坏宏观烈度的定量指标;补充物理尺度,即规定了峰值速度和峰值加速度,使抗震设计能有所依据,并为仪器测定烈度开辟了道路,真正形成具有中国特点的地震烈度表。

3.陈达生等人在《中国地震烈度表 1980》的基础上进一步完善,修订完成《中国地震烈度表 1999》。该表充分吸收 1980 年至 1999 年间在地震现场和历史资料的分析和研究结果,参考国外地震烈度表,采用已有强震观测记录分析和模拟实验结果,保持了《中国地震烈度表 1980》的主要内容,适当增补和修改了一些宏观标志,简化一些描述词语,在说明中对表外的房屋结构震害与烈度评定进行了规定。

4.孙景江等人在 2005 年左右负责新的地震烈度表的修订工作,并在 2008 年完成《中国地震烈度表》(2008),此版地震烈度表是在 1999 年规范的基础上,结合大量已有震害资料和地震烈度评定的经验;充分借鉴参考欧洲地震烈度表(EMS—98),对欧洲地震烈度表中的描述语言进行整理并简化;考虑我国城镇中快速增加的抗震建筑,利用 2008 年汶川地震中部分震害情况。中国地震烈度表(2008)与地震烈度表(1999)保持了一致性和继承性,新增评定地震烈度的房屋类型,即“A 类旧式房屋、B 类无抗震设防的砖砌体房屋和 C 类有抗震设防的砖砌体房屋”,修改了一些在地震现场不方便操作、不常出现的评定指标,此表是我国地震烈度评定和震害损失评估的重要依据。

地震烈度的衡量标准起源于地震烈度表,因此地震烈度表在地震实践的应用和检验中不断得到修正和完善。

1.4 生命线工程的研究发展及在烈度表中的应用

1.4.1 生命线工程的发展和现状

1.生命线工程发展概述

1971 年,美国 San Fernando 地震中旧金山市基础设施遭受重创,震后由 Charles Martin Duke 领导的研究小组首先提出了生命线地震工程(Lifeline Earthquake Engineering)的概念。

1974 年,美国土木工程师学会(ASCE)成立了生命线地震工程技术委员会(TCLEE)。