

DIXIAGONGSHUI GUANXIAN POHUAI SHIYAN JI KANG ZHEN FENXI

地下供水管线破坏试验 及抗震分析

周静海 著

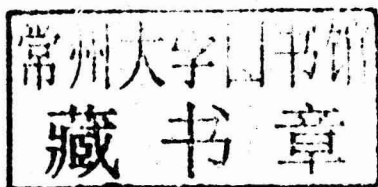


東北大學出版社
Northeastern University Press

辽宁省高等学校优秀人才支持计划(2009R48)

地下供水管线破坏试验及抗震分析

周静海 著



东北大学出版社

· 沈 阳 ·

©周静海 2011

图书在版编目 (CIP) 数据

地下供水管线破坏试验及抗震分析/周静海著. —

沈阳: 东北大学出版社, 2011. 10

ISBN 978-7-5517-0047-4

I. ①地… II. ①周… III. ①地下水—给水管道—破坏性试验 ②地下水—给水管道—抗震性能—分析 IV.
①TU911.36

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 210129 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83680267 (社务室) 83687331 (市场部)

传真: 024—83680265 (办公室) 83680178 (出版部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印 刷 者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 228mm

印 张: 7.5

字 数: 147 千字

出版时间: 2011 年 10 月第 1 版

印刷时间: 2011 年 10 月第 1 次印刷

责任编辑: 刘振军 王延霞

责任校对: 北 辰

封面设计: 刘江畅

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-0047-4

定 价: 25.00 元

前言

城市供水管线作为生命线系统工程的重要组成部分，不但在城市生产生活中发挥着重要的作用，也为震后救灾的顺利进行提供重要的功能保障。我国为地震多发国家，存在随时发生地震灾害以及由此引起的次生灾害的危险，作为城市生命线的地下供水管线的抗灾能力较差，特别是不论新老管线都没有经过抗震设计便被铺设于地下，因此加强对管线的抗震研究对整个城市的防灾减灾能力的提升具有重大意义。

本书从我国城市抗震防灾工作对基础性研究的迫切需要出发，结合我国城市地下供水管网系统的实际情况，在综合分析现有国内外相关研究的基础上，以理论探讨和工程实用性并重为原则，对城市地下供水管网的其中两种管材——柔性接口塑料管及球墨铸铁供水管——进行了较为全面系统的研究。

本书对地下供水管线计算的国内外研究发展水平作出综述，对当前地下供水管线研究的必要性及其重要意义、常用方法和存在的一些问题进行总结、归纳和分析。

本书探讨了各种地震反应分析方法。动力分析方法能够更好地反映管道实际的地震反应特性，该计算方法将地下供水管线周围的土层视为均匀分布，并简化成连续分布的弹簧和阻尼器，管线被看做搁置在弹簧上的梁。

本书对地下供水塑料管及球墨铸铁管进行静载轴向拉伸试验研究，试验过程分为有水和无水试验两类。在试验的基础上，对两种管材的接口力学性能进行分析，采用待定系数法求出不同情况下力和位移的经验关系式，并对关系式进行了误差分析。

本书计算了塑料管道接口的可靠度。以 200mm 和 315mm 两种管径的塑料管道为例，计算管道在 7 度、8 度和 9 度地震力作用下的接口可靠度。对地下球墨铸铁供水管线功能进行分析。绘制球墨铸铁管管内水压变化与接口位移关系曲线，并分别对其进行线性与二次多项式拟合，考虑到实际工程中的计算精度要求，建议使用二次多项式拟合模型。

本书写作过程中自始至终得到导师李宏男教授的悉心指导，借此机会，谨向多年辛勤培育我成长的导师表示衷心的感谢！

另外，本书介绍的研究工作是在刘爱霞、赵海艳、赵爽、宋阳、刘飞、姜涛以及沈阳建筑大学结构试验室的实验技术人员等的参与下完成的，在此对他们所

作出的贡献表示衷心的感谢。

本书成书期间，同济大学李杰教授给予我极大的帮助，在此表示衷心的感谢。

在本书写作过程中，李钢师兄、孙丽师姐给予了我热心的帮助，在此表示深深的谢意。同时感谢沈阳建筑大学李莹教授、谷凡老师和孟宪宏老师，在我学习和研究过程中给予的大力支持和帮助。

作 者

2011 年 6 月

目 录

1 绪 论	1
1.1 课题研究背景	1
1.1.1 我国地下管道抗震设计现状	1
1.1.2 塑料管及球墨铸铁管的特点	1
1.2 课题研究目的和意义	3
1.3 国内外研究现状	5
1.3.1 国外研究现状	5
1.3.2 国内研究现状	8
1.4 发展趋势	10
1.5 本书研究内容	11
2 地下管线震害分析	12
2.1 管线的受震破坏	12
2.1.1 地震对管线的破坏	12
2.1.2 地下管线的破坏类型	12
2.1.3 影响地下管线破坏的因素	13
2.1.4 管线破坏规律	13
2.2 地下管线的地震反应分析	14
2.2.1 研究背景	14
2.2.2 管线地震反应分析	14
2.3 本章小结	20
3 地下供水管线静载拉拔试验	22
3.1 相似理论简介	22
3.1.1 相似原理	23
3.1.2 静力相似	25
3.2 试验准备工作	27
3.2.1 试验目的	27

3.2.2	试件基本情况	27
3.2.3	管件加工	29
3.2.4	试验装置设计	30
3.2.5	试验加载及测量	31
3.3	试验过程和现象	34
3.3.1	试件的安装和调试	34
3.3.2	无水试验过程及现象	35
3.3.3	有水试验过程及现象	36
3.3.4	有覆土试验过程及现象	37
3.4	本章小结	38
4	管件接口力学性能分析	40
4.1	力和位移的关系	40
4.1.1	塑料管件接口力和位移的关系	40
4.1.2	球墨铸铁管件接口处力与位移关系	44
4.2	管件接口力学性能比较	47
4.2.1	塑料管件接口力学性能比较	47
4.2.2	球墨铸铁管接口力学性能比较	49
4.3	曲线拟合与误差分析	51
4.3.1	曲线拟合	51
4.3.2	拟合公式误差分析	57
4.4	球墨铸铁管件注水试验标准差分析	59
4.5	相似理论在塑料管力学性能分析中的应用	63
4.6	本章小结	65
5	塑料管件接口抗震可靠度分析	66
5.1	地下管道抗震可靠度	66
5.1.1	失效概率	66
5.1.2	可靠指标	67
5.2	塑料管件抗震可靠度	68
5.2.1	可靠度基本参数计算	68
5.2.2	可靠度计算结果及分析	70
5.3	本章小结	74

6 地下管线震害动力分析	76
6.1 管线轴向拉伸试验	76
6.2 埋地管线动力模型	79
6.3 地震作用下的埋地管线周围土体变形	81
6.4 埋地管线自由振动动力平衡微分方程的解耦	82
6.5 地震作用下埋地管线反应谱	85
6.5.1 地震作用埋地管线受迫振动动力平衡微分方程 的解答	85
6.5.2 地震动自谱的选取	88
6.5.3 地震作用下埋地管线反应谱	90
6.6 管-土黏滞阻尼系数的试验测定	96
6.7 管线接头耗散能 W_{cr} 的试验测定	97
6.8 地震作用下埋地管线接头部位失效分析	98
6.9 举 例	102
6.10 本章小结	103
参考文献	105

1 绪 论

1.1 课题研究背景

1.1.1 我国地下管道抗震设计现状

20 世纪以来,全世界共发生 7.0 级以上地震 1200 余次,其中 10% 发生在我国^[1-2],这是因为我国地处欧亚地震带和环太平洋地震带之间,地震区域广,发震强度大,发震频率高,是一个遭受地震灾害较为严重的国家。我国有 46% 的城市位于地震区,其中处于 6 度地震区的主要城市有 100 多个。其中,国家重点抗震城市有 14 个;处于 7 度地震区的主要城市有 80 多个,其中国家重点抗震城市有 40 个;处于 8 度地震区的主要城市有 20 多个,其中国家重点抗震城市有 18 个;9 度地震区的国家重点抗震城市也有 3 个^[3]。

而我国城市却普遍对城市减灾防灾重视程度不够,存在较多不利因素,例如:老城市多,城市规划落后,功能分区混乱,城市基础设施差,城市人口和建筑物密度大,特别是在城市建设中,生命线系统抗灾防灾能力较差等。对于城市地下管道系统,目前的状况是新旧种类差别较大,部分老城区的管道铺设时间较长,甚至有百年历史,随着社会的进步和经济水平的提高,管道的种类已实现多样化,出现了多种材质的管道。目前按材质分,我国城市管道主要有钢管、有色金属管、水泥管、铸铁管、塑料管等。这些管道在铺设之前都没有经过正规的抗震设计。基于上述我国多震的地理环境特点,不少大、中城市随时可能遭受中强地震影响,潜伏着发生地震灾害以及由此引起的次生灾害的危险。

1.1.2 塑料管及球墨铸铁管的特点

(1) 塑料管线

随着经济的不断发展,塑料管材迅速发展并广泛应用于城市管道系统,塑料管作为其典型代表应用于给水排水系统。这里所说的塑料特指 U-PVC,学名为硬聚氯乙烯。20 世纪 30 年代,该材质管道在德国开始生产,40 年代该型材在欧洲得到推广应用。目前,诸如美国等一些发达国家,新建的城市供水管道 90% 都采用塑料管道。

我国对这种管道的应用开始于20世纪80年代,经过10年的迅速发展,生产技术已达到较高水平,基本可以满足人们生产生活的要求。目前,塑料管道已成功应用于我国给水排水等管道系统,并以其经济的价格和良好的性能受到广大用户的欢迎,塑料供水管道与其他管道相比有如下优点^[4]。

- ① 耐腐蚀、耐老化,使用寿命长,使用年限50年以上。
- ② 抗冲击性能强,机械强度高,能承受高内压,拉伸强度高。
- ③ 内壁光滑,不易阻塞、不易结垢,流体阻力小,水头损失小。
- ④ 无毒、无味,不出锈水,避免二次污染。
- ⑤ 重量较轻,搬运便利,安装灵活,减少能耗和工程造价。
- ⑥ 密封性较好。
- ⑦ 与铸铁、钢管、有色金属等管比较价格经济。

常见的塑料管道连接方式有以下三种^[5]。

- ① 密封胶圈连接:一般管径不小于100mm时采用胶圈接口。
- ② PVC胶黏连接:一般管径小于100mm的管道采用胶黏接口。
- ③ 法兰连接:当与其他材质管道连接时一般采用法兰连接。

(2) 球墨铸铁管线

20世纪80年代后期,我国开发引进了球墨铸铁管(Ductile Iron Pipe),起初只能生产直径700mm以下的管子,至90年代后期已经能够生产直径100~2000mm的管子。国外在20世纪50年代开发生产球墨铸铁管,60年代发展迅速,70年代成为发展高峰期。球墨铸铁管既具有铸铁固有的耐腐蚀性,又因其组织中的石墨呈球形,因而具有较高的强度与韧性。球墨铸铁供水管道与其他管道相比有如下优点^[6]。

① 球铁管耐压能力在3.0MPa以上,能满足高压输水的要求,加之采用柔性连接,使地下管线有一定的伸缩性和挠度,从而具有良好的抗震能力。1968年日本十胜冲地区7.8级地震的后果统计表明:只有球铁管没有断裂,这对地震区或地耐力差的地区尤为重要。

② 球铁管的耐腐蚀能力大大优于钢管,采用离心法衬以水泥砂浆内衬,具有碱性腐蚀效果,其外部一般涂沥青漆保护,电阻比钢管大,接口采用橡胶圈,故绝缘性好,而且胶圈寿命在常温25℃以下,应力松弛系数为0.5时输水橡圈的平均寿命为150年。球铁管的耐用年限为钢管的3~4倍。

③ 球铁管的强度、韧性比灰铁管高得多,运输、搬运过程中破损率低;采用承插式柔性接口连接,挖土工作量比焊接钢管明显减少,只需简单工具,且不受雨、雪、气温、湿度等自然条件影响,可使施工进度加快、工期缩短。

④ 球铁管因强度高,故壁厚较灰铁管薄约30%,在相同质量下,球铁管的长度

为灰铸管的1.3 ~ 1.4倍,因此,尽管球铁管价格较高,但按长度折算成每千米的价格则增长幅度有限。

⑤球铁管接口一般为T型接口即滑入式接口,即用管道的插口插入承口内,利用插口和承口间的橡胶圈密封和固定的连接形式。其特点是安装简单,但由于没有法兰等紧固件,其连接的强度以及抗不均匀沉降的能力较差,需要采取相应的措施来弥补上述缺点。

1.2 课题研究目的和意义

所谓城市生命线工程系统包括城市供水、供气、交通、通讯与消防诸系统。生命线工程系统在地震灾害的冲击下,会出现大面积功能性障碍,甚至导致城市系统全面的功能瘫痪。近、现代强烈地震的灾害实例,一再说明了生命线工程对于保障城市与区域经济功能的至关重要的地位。

地震震害调查结果表明:多数地下管线的破坏是由于地震波的传播效应造成的^[7]。

最早的城市地下管网震害可追溯到20世纪初:1906年美国旧金山地区8.3级地震,3条主要输水管道遭受破坏,城市配水管网上千处破裂,消防水源断绝,全市起火50余处无法抢救,大火延烧了三天三夜,使14千米²的市区被烧毁,致使火灾造成的损失比地震直接造成的损失高达3倍^[8]。

1923年,日本关东7.9级地震,横滨的5条大口径给水管折断,涌出的水冲毁了桥台和民房,形成水灾。东京市由于供水管道被震坏,供水中断,大火将45万栋房屋烧毁,地震中13万人丧生,其中10万人葬身火海^[9]。

1964年,日本新潟地震,承插式铸铁管中100 ~ 200接口全部被拔出或松动漏水,470多千米输水管线破坏率达68%,使城市供水全部中断^[10]。

1971年,美国圣费尔南多地震^[11]使旧金山市的基础工程设施遭到重创,地震区有11条输电线路,47座高速公路桥梁,600多处供水和供气主干管线遭受严重破坏。而在地震中和地震后,电力系统、城市供水系统、交通系统在系统功能上的破坏与丧失更引起了人们极大的关注。

1975年,我国海城7.3级地震,营口市150多千米管道发生接头损坏、松动,管体折断等372处^[12],造成管道大量漏水,严重影响生活用水、生产用水和消防用水。营口市震后火灾高达一天36次,经过一个多月的抢修,才基本恢复正常。

1976年,我国唐山7.8级地震,唐山市220千米给水管全部瘫痪,给人民生活带来极度的困难,最初只能靠河沟水和汽车运水,几天后由其他城市支援用消防水龙临时供水,经过一个多月的抢修,才基本恢复正常。唐山市郊工厂,邻近的天津、

塘沽、汉沽等地的给水管网也都受到严重的震害,天津塘沽区供水干管损坏 332 处,抢修半个月,仅恢复震前 50% 的供水能力^[13-16]。

1985 年发生的墨西哥地震,造成墨西哥市供水管网、煤气管网的大面积破坏。地震中城市供水管网主干管线破坏达 800 余处。煤气管网的中压管线破坏达 400 余处。由于煤气管断裂引起煤气爆炸,在墨西哥市区引起多起火灾。同时由于供水管网的破坏,使救火受到严重影响^[17]。

1989 年,美国 Loma Prieta 地震^[18],其典型特点是电力系统的显著破坏。地震中,230kV 和 500kV 的高压变电站破坏严重,由此造成 140 万用户断电。同时旧金山市供水管网系统发生 350 处需要修复的严重破坏。供水管网的破坏严重延缓了次生火灾的扑救。旧金山市城市供气系统出现漏气达 1000 余处,软土地基上的油罐大量被破坏。

1994 年发生在美国的洛杉矶大地震,除供水、供电、交通系统的严重功能破坏之外,仅供气系统漏气即高达 15 万处,供气系统的破坏引发了大量次生火灾。

1994 年 1 月 17 日,美国北岭 6.7 级地震,圣费尔南多峡谷北部 3 条主要输水管道破坏,导致几个星期的停水,主干管道 74 处破坏,支管网破坏严重,大约 1200 处渗漏^[19]。

1995 年发生在日本的阪神大地震^[7,20],神户地区主干供水管网发生 1610 处严重破坏,110 万用户断水,一周后仅修复三分之一,全部修复工作持续两个半月,缺水严重阻碍了救火。

1996 年 2 月 3 日,中国云南丽江 7 级地震,造成丽江市多处供水管道破坏,供水中断^[21]。

1999 年中国台湾大地震,导致 2448 人死亡,受伤 11305 人,经济损失达 4439 亿元新台币。地震造成台中地区交通中断,名竹大桥等一批桥梁坍塌,台中火车站等严重破坏。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 户,直接经济损失达 59.4 亿元新台币。水利基础设施经济损失达 47.2 亿元新台币,供水管线损失达 9.5 亿元新台币^[22]。

2002 年 4 月,中国台湾强烈地震造成台北县四处送水管管线被震断破裂,虽然经过抢修施工,但仍影响到 25 万户的用水^[23]。

惨痛的地震灾害教训,使人们逐步领悟到城市地下供水管网系统的重要性,认识到它对震后抢险救灾的指挥调度,救灾人员和物资的运输和调配,以及人民生命财产安全和维持城市的正常生活都是至关重要的。特别是从政府的管理职能和减轻城市地震损失的角度来看,地下供水管网系统无疑比一般建筑物处于更加重要的地位。地下供水管网系统一旦遭受破坏,城市就会处于瘫痪状态,社会经济活动和人民生活将受到极为严重的影响。因此,对管线抗震性能的研究是十分必要的。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 国外研究现状

震害经验表明:埋地管线的破坏主要由地震波传播、场地液化、地面永久变形等因素引起^[8,24-25]。

Newmark 等(1975)提出了地下管道在地震波作用下的分析方法^[26],模型忽略了管道惯性力影响,假定管道与土一起运动,管道应变等于土应变,地震波动用地震行波来模拟,管线的抗震设计一般由最大轴应变控制。

Shinozuka 和 Koike(1979)提出了管线与土之间相互作用的理论^[27],发展了弹性地基梁模型,该模型将管线与土之间用若干弹簧连接,土体的波动位移通过弹簧传给管线。将地震波简化为简谐波,当地震激励水平较低时,管道与土共同工作,当地震激励水平较高时,管道与土出现滑移,考虑管道与土之间的滑移,引入应变传递系数。目前,国内外地下管道抗震设计规范主要基于上述两个模型。

Nelson 等(1979)采用振型分解法对分段管线进行了动力分析,提出了动力计算的干扰反应谱法^[28]。同年,Hindy 和 Novak 提出用平面动应变与静态 Mindlin 解相结合的方法来计算土与管线的动力相互作用,引入了土管线动力相互作用的概念,并对地震波入射角、波速、埋深、管径、接头等因素进行了系统的研究。

Wang 等(1985)基于对震害的分析和试验研究,提出了地下管线的伪静力分析方法^[29],该方法舍弃了惯性力的影响和阻尼力的影响,同时还对管线的轴向反应进行了研究,发现地震波输入相位差和场地不均匀是影响地下管线反应的两个最主要因素,在此基础上,提出了相应的抗震设计方法。

Goto 等(1982)结合日本京都供水管网,考虑了管道材料、接头、土和地面运动等众多因素,进行了地震反应计算,计算采用梁模型和传递矩阵的方法。

Takada(1987—1990)采用传递矩阵对管线进行了三维拟静态分析,同时考虑了接头的非线性和土与管线之间的滑移,采用壳模型和有限元方法计算了梁模型不能涉及的管道环向应力和沿管周的土压力分布。

O'Rourke 等(1989)研究了因地震面波引起的场地应变对管道的影响,发现面波与体波相比会产生较大的场地应变^[30]。

Owens(1999)采用集中质量模型,采用时程分析得到了不同支撑条件下的管道应力,可供设计考虑。

在地震作用下的场地液化是一种特殊现象,常伴随较长持续时间的强地震激励。场地液化对穿越管道的影响可分为三类:一是液化过程中的浮力常导致与入孔

等相接管道的破坏;二是液化常导致横向变位等大的地面永久变形;三是由液化区和非液化区组成的不均匀场地的动力特性差异会造成穿越过渡区管道的破坏。日本学者对此进行了深入研究^[31-35]。文献[33]通过分析一煤气管道的破坏过程,发现地面永久变形是其破坏原因;文献[34]调查了1983年日本海中部地震中12条煤气管道的破坏原因,得出管道破坏是由于场地液化过程中的动力拉压作用而不是(静力)地面永久变形造成的;文献[35]进行了穿越部分液化区管道的动力模型试验,结果表明,穿越过渡区可能是管道破坏的主要原因。由此可以看出,对穿越液化区管道破坏的原因还存在不少争议,值得进一步深入研究。

Matsushita 和 Makoto^[36](1999)在对1995年阪神大地震造成的神户供水系统损害的讨论中介绍了现状供水系统,并检查了公司实际的复苏进程,总结出一些经验教训。基于这些对震后恢复、重建及优化战略供水系统进行了讨论。

Scawthorn Charles, Johnson Gayle S., Porter Keith^[37](1999)提出可靠运行的生命线,需要根据地震的抗震可靠性评估各种相关设备,如水泵、电机、控制设备等的抗震性能评估,这些设备可以是一个重大的任务,同时可靠性指标却好界定。该系统的风险评分为基础的系统拓扑结构和分量地震漏洞。

Toprak Sencuk, O'Rourke Thomas D., Tutuncu Ilker^[38](1999)介绍了可视化的空间分布供水管道损坏下地震利用地理信息系统(GIS)。管道损坏表示为一个修复率(利率)。修复率轮廓是将地理信息系统的开发与研究领域划分成网格细胞($n \times n$)的,确定了一些具体管道维修在每个网格单元,并划分若干修理的长度,管道在每个单元的面积。由此产生的等高线图是一个二维可视化的点源的损害。这种关系体现在两个无量纲参数——阈值面积(交咨会)和无量纲网格尺寸(DGS)。

Kameda 和 Hiroyuki^[39](2000)对地震中保护城市生命线进行了讨论。事态发展的生命线地震工程审查了关于它的历史趋势和实际执行。特别是建立与提升城市抗震可靠性。最后,提出了需要为进一步发展“第三代”地震工程的建议。

Kameda 和 Hiroyuki^[40](2000)在本国最先进的生命线系统管理下对地震风险进行了讨论。经过历史概况和具体生命线地震工程的特点,以生命线地震工程实践为内容而提出。它们包括大纲生命线保护技术,经验教训,特别是最近的城市神户1995年地震和抗震规范的发展,并提出两个议题,具体解决:首先,根据系统的抗震可靠性互动讨论其总体方案和分析方法;其次,对标准的生命线表现讨论重点放在量化的质量问题的需要,特别是在执行过程中。

Han Yang, Sun Shaoping^[41](2002)建立了一个最低限度的道路网络系统,并将立方米符号用来描述逻辑功能的网络中一个十分均衡的状态,并用于构造最小路集不交的网络。计算机程序已经制定,并结合分解技术的可靠性,对一般生命线网络可以有效和自动地计算。

Werner Stuart D., Taylor Craig E.^[42] (2002) 发现组件模型的脆弱性的一个重要组成部分是生命线的自然灾害的评价风险系统。这种模式要求估计元件的损伤状态以及相关的维修费用和停机时间的函数的类型和程度的发展来分析自然灾害现场。

Cagnan Z. 和 Davidson R.^[43] (2003) 介绍了基于仿真的方法而开发的模型震后恢复过程的一部分, MCEER 研究洛杉矶水电部门和电力公司 (LADWP) 的电力和供水系统。震后恢复模式使用估计对经济的影响方面发挥重要作用。震害生命线系统的重点是电力系统的研究, 但在未来拟议的方法将扩大到建立一个多生命线恢复模式, 可以考虑到基础设施的影响, 相互依存的恢复过程。讨论了现有的建模方法恢复, 上市的优点和缺点。新的基于模拟的方法描述和关键创新技术, 有别于以往的方式解释。然后制定了详细的初步模型, 并计划为今后的工作进行了讨论。

Hosseini Mahmood 和 Shemirani Leila Niaz^[44] (2003) 讨论了如何使城市规划者和设计师发挥最大的作用以减轻地震风险。在大型城市建立风险考虑和减灾能力的生命线系统。起初, 一些以往研究由城市规划者和设计师, 也是生命线地震工程专家关于减轻地震风险进行审查。这些角色是讨论关于城市发展和土地使用、生命线地震工程和可持续发展问题。给出了可以帮助大大减轻城市地区地震危险性的建议。

Hosseini Mahmood^[45] (2003) 简要介绍了伊朗不同地区的天然气开发情况, 以及用于发展中国家的资源的基础。

在 Honegger Douglas G., Laatsch Edward M., Sheckler Timothy D.^[46] (2003) 的倡议下, 美国生命线联盟 (ALA) 以发展民族共识准则的设计, 对生命线系统的自然和人为灾害进行了讨论。

Jones S. L., O'Rourke T. D., Stewart H. E. 等^[47] (2003) 提出生命线系统, 以提供电力, 天然气和液体燃料, 电信, 交通, 污水设施, 以及供水所代表的一些建筑环境。该项目将开发先进的模拟和实验评价关键生命线地震条件下的组成部分。

Nojima Nobuoto, Sugito Masata^[48] (2003) 提出了概率评估模型震后的剩余能力用于公用事业生命线系统的建议。

Campbell Kenneth W., Seligson Hope A.^[49] (2003) 提出了一种定量的方法, 针对发展中国家地震情景的危险, 可用于概率评价抗震性能的地域分布生命线系统。这些地震情景的定义必须符合危险的平均概率为某一范围的地面运动的价值确定损害国家指定的系统及其组成部分。其结果是一组不同的情景为每个损伤状态。概率定义地震情景, 而不是点估计的概率确定地面摇晃。该程序适用于两个假设的生命线系统, 一个在南加州, 一个在地理上集中的和其他不同地区, 并显示给一个合理的一套灾害一致地震条件下的情景。

Brunsdon David, Evans Noel^[50] (2003) 介绍了新西兰在过去几年中生命线工程的重大发展。该区域为基础的多学科的生命线工程模型已扩大到涉及生命线工程新西兰 16 个地区的每一个。该模型是基于应用的原则, 国际风险管理标准 AS / NZS 4360:1999 通过合作进程。

Bird Juliet F. 和 Bommer Julian J.^[51] (2004) 提出了地震中地面晃动被广泛认为是造成结构破坏、生命损失和人员受伤的主要原因。然而, 有许多例子, 如地震造成的破坏在地面引起了重大的损失。

Tang Ai-Ping, Ou Jin-Ping, Lu Qin-Nian 等^[52] (2006) 研究了生命线, 如管道、交通、通讯、电力输送和医疗救助制度, 是复杂的网络, 总是散发空间大的地质和地理单元。该方法对网络可靠性的生命线系统是基于故障树分析 (FTA) 和地质信息系统 (GIS)。

Park Jaewook, Nojima Nobuoto, Reed Dorothy A.^[53] (2006) 对 2001 年 2 月的地震进行了城市电力分配系统的性能的评估并定性为 Nisqually 地震。

Lu Suikai, Heuer Rudolf^[54] (2007) 提出了一种生命线地震评估机构组成的无加强砌体 (URM) 墙壁的新方法。

1.3.2 国内研究现状

我国的生命线地震工程研究工作起始于 1974 年, 当时的研究工作主要是针对地下管线进行的。从事这方面研究的代表人物有同济大学李杰教授、北京市政工程研究院孙绍平教授、冶金部建筑研究总院侯忠良教授、北方交通大学赵成刚教授、中国地震局工程力学研究所冯启民教授和中国地震局地球物理研究所胡聿贤教授等。

我国对地下管线的研究也始于 1974 年。叶耀先等 (1982) 通过直管和弯管在不同管沟回填方式下的爆炸振动试验, 探讨了管土间共同变形问题, 提出了管线地层应力计算模型^[55]。

熊占路 (1987) 采用离散的梁模型对管线进行地震反应分析, 同时考虑横向和纵向振动对地下管线作用的动应力分析^[56]。

王海波和林皋 (1988) 采用边界元方法求解了半无限弹性介质中土与管线动力相互作用, 研究发现, 相互作用的强弱取决于波的不同频谱成分, 管线埋深越浅, 相互作用影响越显著^[57]。

甘文水和侯忠良 (1988) 应用有限元方法, 对埋设管线在地震行波作用下的反应进行了计算, 探讨了土弹簧刚度, 管与土之间的滑移、波速等因素对管线反应的影响, 并与现行简化方法进行了对比^[58]。

徐植信 (1990) 采用解析法进行了具有保护层的管道对体波的反应, 结果表

明,适当厚度的保护层可以有效地降低管偶应力。

梁建文(1991)借助于半无限空间动力问题的基本解来求解土与管线的动力相互作用,通过频域转换对地下管线求解了地震反应,并于1996年提出了土与管线相互作用的三维模型。

屈铁军和王前信(1993)采用级数解方法分析了地下管线的纵向振动^[59]。

近年来,随着研究的深入,采用有限元模型进行土体-管线的综合分析,以深入研究管线地震破坏机理,成为重要的发展趋势。例如:李昕和周晶(2001)将管线考虑为两节点梁单元,土采用四边形等参元,管-土之间采用了Goodman无厚度接触单元,并考虑了质量、阻尼的影响,采用El-center波进行了管线的动力有限元分析。艾晓秋、李杰(2005)提出了精细化地下管线抗震分析方法。该方法将管线周围的土体视为固-液二相介质,考虑地震过程中土体内孔隙水压力的增长和消散、非线性的土体本构模型、地下管线与周围土体的接触界面作用,建立了综合分析的有限元模型,可以实现地下管线地震反应的全过程数值模拟^[60-61]。

地震经验表明,不均匀场地中管道的震害率明显高于均匀场地。日本学者通过实际地震观测,总结出了场地不均匀程度与管道破坏率之间的关系^[62],但由于观测数据的地震动幅值均较小,有待于进一步观测和总结强震作用下的规律。文献^[63-70]研究了地震波传播作用下穿越两种土介质管道的地震响应,发现管道破坏出现在两种土介质交界面附近;梁建文^[71-72]分析了穿越三种土介质管道的动力特性,发现地震波会在两个交界面之间集聚,不能将三种土介质简单看做两个两种土介质场地的组合。梁建文等还研究了穿越非发震断层^[73]、沉积河谷^[74]、河床底部^[75]等不均匀场地的管道的地震响应等。文献[76]评述了不均匀场地对管道动力特性的影响。这些研究为有关场地中埋设管道的抗震设计奠定了理论基础。

与前述理论研究相对比,在管道抗震理论应用于工程设计方面,则显得相对薄弱。1978年,我国颁布了第一个地下管线抗震设计规范——《室外给水排水和煤气热力工程抗震设计规范》(TJ 32—78)。该规范的计算方法应用波动理论,考虑了剪切波对长直管线引起的轴应变(应力),应用半经验法,考虑了管土间的弹性相对位移,采用场地土层的平均剪切波速取代土的弹簧刚度系数。该规范的实质是半经验方法,研究表明:半经验方法计算出的传递系数过小,影响结构安全。2003年,我国颁布《室外给水排水和煤气热力工程抗震设计规范》(GB 50032—2003),管道抗震的内容变化不大,表明管道抗震理论应用于工程设计实用的进展甚微,仍然有大量的研究工作需要开展。

仲伟涛、孙绍平^[77](1994)基于模糊数学原理对地下管道进行一级和二级模糊综合评判,得出管道破坏概率分布,作出管网震害预测和经济损失分析。

孙丹辰^[78](1989)用壳模型分析管道在断层滑动时的屈曲效应,得到如下结