

地下管线的抗震可靠性研究

DIXIA GUANXIAN DE KANGZHEN KEKAOXING YANJIU

何双华 柳春光 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

要 點 奇 聞

地下管线的抗震可靠性研究

何双华 柳春光 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书利用 Ansys 软件对沉陷区和液化土中埋地管道建立有限元分析模型, 进行地震响应及可靠性研究, 并提出相应的抗震减震措施。基于对地震波作用下的埋地管道单体的可靠性分析结果, 采用 Mento-Carlo 方法对管网系统进行连通可靠性分析, 并进行震后带渗漏状态管网系统的水力分析及功能可靠性分析, 进而评价震后管网系统的服务性能及地震易损性, 根据震害结果进行管网系统的加固优化。

图书在版编目 (C I P) 数据

地下管线的抗震可靠性研究 / 何双华, 柳春光著
— 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 9
ISBN 978-7-5170-2542-9

I. ①地… II. ①何… ②柳… III. ①地下管道—抗震—可靠性—研究 IV. ①U173. 9

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第270527号

书 名	地下管线的抗震可靠性研究
作 者	何双华 柳春光 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.25印张 380千字
版 次	2014年9月第1版 2014年9月第1次印刷
印 数	001—500册
定 价	32.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

1 绪 论

1.1 引言

随着我国国民经济的迅速发展,埋地管线已经成为现代社会生活中的一种重要的基础设施,被广泛应用于供气、输油、城市供水及通信等系统中(如南水北调、西气东输等重大工程),在社会生产和生活中发挥着非常重要的作用。

地震是人类面临的最严重的突发性自然灾害之一。我国处于环太平洋地震带和欧亚地震带之间,地震区域广、强度大、发震频率高,是世界上遭受地震灾害最为严重的国家之一^[1]。20世纪,在地震灾害中直接死亡的人数达160万人,其中我国由地震造成的直接死亡人数超过55万人,占52%。20世纪70年代是地球上地震灾害频发的10年,全世界死于地震灾害的总人数达41.29万人,中国占63.7%。例如,1976年的唐山地震中,死亡人数达24万余人,强震区中建筑物、交通、水、电、通信等系统都遭到极其严重的破坏。

供水、供气、供电、通信、交通等工程设施是现代生产和社会生活赖以维持的基础性设施,人们形象地称之为生命线工程^[2,3]。埋地管线的主要特点是管道的跨越距离比较长,侧向的抗力比较弱,受到各种突发灾害袭击时,特别容易遭到破坏。强震发生时,地下管线的破坏会造成系统功能失效,并可能引发次生灾害,如火灾、爆炸等,会带来巨大的甚至是灾难性的后果,给人们的生命财产造成重大损失。

例如,1906年美国旧金山地震,由于3条主要输水管遭到破坏,城市配水管网上千处破裂,消防水源断绝,以至由地震引起的火灾无法及时扑灭,大火燃烧3个昼夜,800人死亡,财产损失4亿美元^[4]。1923年日本关东大地震,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。东京市供水中断,大火烧毁约36 km²的市区^[5]。1971年美国圣费尔南多地震,饱和砂土液化导致圣诺曼水库东西两侧覆盖土层中长1.5 km、宽200 m、平均坡度为2.5%的大面积地域产生不均匀滑动,滑动的最大水平位移达2 m,从而使包括供水管线、供气管线、污水管线在内的地下管线严重受损。在地面滑动区域内,11条穿过大位移区主要干管和支线都遭破坏,管线最大不均匀横向位移达1.7 m。1975年海城地震时,管道遭到不同程度的破坏,输配水管网大量漏水,不能保证正常供水量和水压,有的地方甚至供水中断;排水管道的震害主要是管段破坏和堵塞,城市生活污水和工业企业的有害污水不能顺利排出,因而渗入地下,污染地下水源,后果严重^[6]。1976年唐山大地震中,取水泵房70%倒塌,送水泵房80%被严重破坏,管网平均震害率每公里4处,整个城市供水系统瘫痪,一周内无法供水;天津市直径200 mm以上的干管破坏58处,破坏率达每公里0.18处;天津市塘沽区由于地基液化和震陷现象显著,管网损失严重,抢修半个月仅恢复震前50%的供水能力^[7,8]。1994年美国洛杉矶北岭大地震,圣费尔南多峡谷北部3条主要输水管道遭破坏,导致几个星期的停水,主干管道74处被破坏,支管网破坏严重,大

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 地下管道的地震反应研究进展	3
1.3 地下管道抗震可靠性研究进展	10
1.4 地下管网系统的抗震优化研究进展	13
1.5 地下管线的抗震设计	18
2 地下管道的地震反应及可靠性分析	22
2.1 地下管道的震害分析	22
2.2 地面永久变形作用下埋地管道的地震反应分析	26
2.3 强地面运动作用下埋地管道的地震反应分析	43
2.4 地下管道的抗震可靠性分析	50
3 沉陷区埋地管线的可靠度分析	60
3.1 埋地管线有限元模型的建立及检验	60
3.2 沉陷区连续埋地管线的可靠度分析	68
3.3 沉陷区不连续埋地管线的可靠度分析	79
3.4 隔震埋地管线的地震响应分析	87
4 液化土中埋地管线的响应分析	94
4.1 场地土的地震动液化	94
4.2 基于土弹簧模型的液化土中埋地管线响应分析	108
4.3 液化土中埋地管线的上浮反应分析	117
4.4 减小液化管线上浮反应的措施	126
5 地下管网系统的连通可靠性分析	132
5.1 网络系统可靠性分析基础	132
5.2 基于最小路和最小割算法的管网可靠性分析	135
5.3 基于图论理论的管网连通可靠性分析	139
5.4 基于模糊数学理论的管网连通可靠性分析	142
5.5 算例分析	145
6 地下管网系统的抗震功能可靠性分析	153
6.1 无破坏状态下供水管网的水力分析	153
6.2 震后带渗漏管网的水力分析	158
6.3 管网系统抗震功能可靠度分析	169

7 地下管网系统震后服务性能及易损性评估	174
7.1 管网系统服务性能的模糊评价	174
7.2 管网系统地震易损性评估	191
8 地下管网系统的抗震加固优化	200
8.1 管网系统优化数学模型及求解方法研究	200
8.2 管网系统的抗震加固优化模型的建立	204
8.3 管网系统的抗震加固优化模型的求解	207
8.4 算例分析	210
参考文献	227

1 绪 论

1.1 引言

随着我国国民经济的迅速发展,埋地管线已经成为现代社会生活中的一种重要的基础设施,被广泛应用于供气、输油、城市供水及通信等系统中(如南水北调、西气东输等重大工程),在社会生产和生活中发挥着非常重要的作用。

地震是人类面临的最严重的突发性自然灾害之一。我国处于环太平洋地震带和欧亚地震带之间,地震区域广、强度大、发震频率高,是世界上遭受地震灾害最为严重的国家之一^[1]。20世纪,在地震灾害中直接死亡的人数达160万人,其中我国由地震造成的直接死亡人数超过55万人,占52%。20世纪70年代是地球上地震灾害频发的10年,全世界死于地震灾害的总人数达41.29万人,中国占63.7%。例如,1976年的唐山地震中,死亡人数达24万余人,强震区中建筑物、交通、水、电、通信等系统都遭到极其严重的破坏。

供水、供气、供电、通信、交通等工程设施是现代社会生产和人民生活赖以维持的基础性设施,人们形象地称之为生命线工程^[2,3]。埋地管线的主要特点是管道的跨越距离比较长,侧向的抗力比较弱,受到各种突发灾害袭击时,特别容易遭到破坏。强震发生时,地下管线的破坏会造成系统功能失效,并可能引发次生灾害,如火灾、爆炸等,会带来巨大的甚至是灾难性的后果,给人们的生命财产造成重大损失。

例如,1906年美国旧金山地震,由于3条主要输水管遭到破坏,城市配水管网上千处破裂,消防水源断绝,以至由地震引起的火灾无法及时扑灭,大火燃烧3个昼夜,800人死亡,财产损失4亿美元^[4]。1923年日本关东大地震,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。东京市供水中断,大火烧毁约36 km²的市区^[5]。1971年美国圣费尔南多地震,饱和砂土液化导致圣诺曼水库东西两侧覆盖土层中长1.5 km、宽200 m、平均坡度为2.5%的大面积地域产生不均匀滑动,滑动的最大水平位移达2 m,从而使包括供水管线、供气管线、污水管线在内的地下管线严重受损。在地面滑动区域内,11条穿过大位移区主要干管和支管都遭破坏,管线最大不均匀横向位移达1.7 m。1975年海城地震时,管道遭到不同程度的破坏,输配水管网大量漏水,不能保证正常供水量和水压,有的地方甚至供水中断;排水管道的震害主要是管段破坏和堵塞,城市生活污水和工业企业的有害污水不能顺利排出,因而渗入地下,污染地下水源,后果严重^[6]。1976年唐山大地震中,取水泵房70%倒塌,送水泵房80%被严重破坏,管网平均震害率每公里4处,整个城市供水系统瘫痪,一周内无法供水;天津市直径200 mm以上的干管破坏58处,破坏率达每公里0.18处;天津市塘沽区由于地基液化和震陷现象显著,管网损失严重,抢修半个月仅恢复震前50%的供水能力^[7,8]。1994年美国洛杉矶北岭大地震,圣费尔南多峡谷北部3条主要输水管道遭破坏,导致几个星期的停水,主干管道74处被破坏,支管网破坏严重,大

约 1200 处渗漏^[9]。1995 年日本阪神地震, 神户地区供水系统遭到严重破坏, 90% 的供水设施受到影响, 293 处水管破裂, 908 处水管接头开裂, 238 处水阀和消火栓被震坏。大约 73% 的居民震后 3d 无饮用水, 经过两个月的抢修才恢复正常^[10, 11]。2008 年汶川大地震造成灾区供水设施大面积毁损, 四川全省 181 个市县区, 受地震影响的有 126 个市县区, 受损水厂 156 个, 受损供水管道累计达 47642.5km^[12]。

这些惨痛的地震灾害教训使人们开始重视生命线地震工程领域的研究。1974 年, 美国土木工程学会 (ASCE) 成立了生命线地震工程技术委员会 (The Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering), 并于 1978 年召开了第一次学术会议, 出版了生命线地震工程专辑^[13]。1977 年美国机械工程学会 (ASME) 压力容器和压力管道委员会成立了生命线地震工程专门学组 (Task Force on Lifeline Earthquake Engineering), 并于 1979 年召开了生命线地震工程专业组的学术会议, 出版了生命线地震工程论文集^[14]。此外, 美国土木工程学会生命线技术委员会也出版了有关生命线地震工程的专著^[15, 16]。

继美国之后, 日本也开展了生命线地震工程的研究, 并于 1976 年在东京召开了第一届美日生命线地震工程会议。1978 年颁布了《大规模地震特别措施法》, 着重强调了防震减灾对策的重要性, 并注重研究总结震害经验, 不断修订完善相关的规范。1979 年日本自来水协会出版了《给水工程设计指南》, 综合了日本在供水系统抗震研究方面的成果。1983 年日本煤气协会 (JGA) 出版了《地下煤气管线抗震设计实用建议》, 1991 年和 1998 年编辑出版了《生命线地震工程》、《地震与城市生命线系统的诊断与恢复》等专著。在生命线地震工程领域的代表人物久保庆三郎 (Kobe)、片山恒雄 (Katayama) 等学者也发表了许多有关生命线地震工程的文章^[17, 18]。

唐山地震之后, 我国成为世界上城市生命线地震工程研究较为活跃的国家之一。建设部于 1978 年颁发了《室外给水排水和煤气热力工程抗震设计规范》(GB 50032—2003), 1982 年颁发了《室外给水排水工程设施抗震鉴定标准》(GBJ 43—82) 和《室外煤气热力工程设施抗震鉴定标准》(GBJ 44—1982) 等。唐山地震后, 刘恢先主编的《唐山大地震震害》一书收入关于生命线地震工程的现场考察报告 50 余篇, 对这次地震进行了全面、深入的考察, 取得了丰富的成果。1990 年侯忠良等出版了《地下管线抗震》、1994 年赵成刚等出版了《生命线地震工程》、2002 年苏幼坡等出版了《城市生命线系统震后恢复的基础理论与实践》、2005 年李杰出版了《生命线工程抗震》、2005 年柳春光等出版了《生命线地震工程导论》等专著^[19]。

20 世纪 80 年代中期, 我国生命线地震工程界开始与日本、美国开展科研合作。自 1990 年在北京召开首届中国-日本双边生命线地震工程会议以来, 中国、日本和美国三国在生命线地震工程方面的研究学者每隔 4 年聚会一次, 已连续举办了 4 届“中日美生命线地震工程学术讨论会”, 并出版了系列会议论文集, 促进了三国在生命线地震工程领域的发展和交流。

由于生命线工程本身的复杂性、网络性、空间分布的广泛性、破坏的相关性等造成其地震灾害非常严重。供水系统作为城市主要的生命线分支之一, 在近几十年发生的多次破坏性地震中, 无一例外地遭到严重破坏。供水系统是由元件和节点组成的具有连通性和功能性双重要求的多连通网络系统, 地震时, 供水系统中部分元件的破坏 (如管道的断裂等) 往往会引起系统的一部分或全部功能的失效^[20, 21]。目前, 我国处于地震多发期, 大多数城市的供水管网系统又没有经过正规的抗震设计, 且正处于老化、规模不足阶段, 因此, 开展从元件

到系统层次的供水管网系统抗震可靠性分析及加固优化研究,作为城市防震减灾工作的内容之一,具有重要的学术意义和实用价值。

1.2 地下管道的地震反应研究进展

1.2.1 跨断层埋地管道反应研究进展

1.2.1.1 理论研究方面

地震灾害中,断层对地下管道的破坏很严重,许多历史地震震害中都出现过由于断层滑动而造成的地下管道的破坏。如1971年美国圣费尔南多地震中,25%的损坏发生在断层滑动区,而出现断裂的面积仅为受强烈地震动面积的5%。跨越断层的埋地管道方面的研究成果也颇为显著。

Newmark和Hall(1975)首次提出跨越断层埋地管线地震反应分析方法^[22],由此奠定了管道跨越断层的梁式分析基础。Kennedy等(1977)对Newmark的方法作了改进^[23],通过考虑均匀的动态土壤压力和大挠度理论来计算管道的伸长,采用在断层附近为圆弧和远端为直线的位移模式,得出走滑断层的临界断层位移。王汝樑(1985)修改了Newmark和Kennedy方法的一些假设^[24],提出采用局部大挠度梁模型来分析穿过走滑断层的地下管线的性能,考虑了弯曲刚度的影响,所得变形和内力趋于合理。

1991年,甘文水、侯忠良等人提出了一种基于有限元理论的穿越断层区管道抗震的分析方法,该方法将管线简化为置于弹簧之上的连续梁,并考虑了横向土弹簧和管道本身的非线性特征,根据虚功原理建立了管道的平衡方程,并用迭代法求解管道在断层位移作用下的反应。

1994年,梁建文提出用3种不同水平向连续土介质模型模拟断层,研究穿过此断层埋地管道的三维地震反应,验证了地震波在断层滑动面处产生累积,管道内应力峰值出现在断层滑动面中间。而且断层对P波和S波传播有不同影响,进而对管道产生不同的作用,管道的动力反应主要由滑动面相对宽度与3种土介质的刚度相对比值决定,滑动面相对越宽,土介质刚度越小,管道破坏越明显。

2002年,刘爱文等针对土耳其地震和台湾集集地震中埋地管道的震害,采用等效边界条件,用薄壳有限元方法研究大的断层运动对埋地管道的作用,将断层附近管道用塑性薄壳单元模拟,远离断层位置管道用非线性弹簧单元模拟。研究发现如果断层位错很大,那么软土部分的管道会产生“第3个屈曲点”,这些震害分析结果对管道铺设很有参考价值。

2005年,刘学杰等讨论了地下管道跨断层时的反应,并提出了以应变为基础的设计方法。该方法对比了Kennedy方法和有限元方法,建议断层运动可以分为轴向分量、水平面的侧向分量和竖直分量。管线受到弯曲和轴向拉伸时,地下管道可能发生局部屈曲,宜采用Kennedy方法分析;受到弯曲和轴向压缩时,地下管道可能发生局部屈曲,宜采用有限元方法计算。

2007年,林均岐等采用圆柱壳单元模拟地下管道,用有限元模拟手段建立了管道土体相互作用分析模型,采用非线性接触问题分析方法分析了管道因断层运动而产生的反应^[25]。

基于以上分析可以看出,国内外学者对埋地管道在断层作用下的反应分析计算方法可分为两种:理论解析方法和数值有限元方法。理论分析方法和有限元方法比较,理论分析方法因其建模过程比较简单且易于手算,便于应用在实际工程中,但因其多采用理想模型,忽略管道实际反应的复杂因素,导致理论分析方法的分析计算结果多数偏于保守。有限元方法采用连接3个方向的土弹簧来考虑管道与土之间的相互作用,在模拟跨断层埋地管道的实际震害和抗震实验时,多采用此方法,因其可较好地模拟跨断层管道的实际破坏过程。工程应用分析较少采用有限元分析方法,因其建模过程相对复杂。

1.2.1.2 试验研究方面

1988年,高田至郎等在振动台上利用剪切变形沙箱进行模拟试验研究,按照1:16的几何相似比,进行了地下管道的液化分析,将试验结果结合弹性地基梁解析解,确定研究模型中简化土体的等效弹簧常数取值范围,这对后来的跨越断层运动埋地管道地震反应分析工作有很大的启发和推动作用。

2000年,冯启民、郭恩栋等进行了国内首次研究钢管的静力和动力分析试验,实验采用钢管和铝管两种管材作为研究对象,利用1:30的几何相似比;管线周围土体为亚黏土。使两个土箱产生相对运动,实现对埋设在土箱中的管道施加断层位错的作用。在振动台上进行拟静力加载和动力加载的两阶段实验研究,通过仪器监测箱体的错动位移和管道变形,并采用梁式模型分析计算了跨断层管道的变形和强度。

2004年,日本学者 Sustumu Yasuda 等做了多种试验来模拟走滑断层和逆断层错动时跨断层埋地管线的反应。试验采用一段固定、一段运动的两段土箱来模拟断层运动。为了探明各种物理参数对跨断层埋地管道反应的影响程度,进行了一系列不同埋深、管径、跨越角、剪切破裂面及管道周围地基土剪切波速不同条件下的管道抗震试验。

试验研究对分析跨断层埋地管线反应的理论分析方法的改进和完善提供了有效的参考佐证,其能够定性地重现断层作用下管线反应的整个过程,既有助于了解管土相互作用的机理,又有助于认识不同受力下的多种破坏模式。

1.2.1.3 影响参数研究

随着试验研究揭示出的埋地管线变形失效的新特点,针对影响参数的研究日趋成为新的研究热点。一系列关于跨断层埋地管线的影响参数的研究分析,有利于提高在地震断层作用下管道的反应能力。在实际管道铺设时,可以有效地采取跨断层埋地管道的抗震措施,减轻实际地震断层作用下埋地管道的震害。

影响参数主要指影响埋地管线反应的相关因素,这些因素包括管道管材性质、场地土体的本构关系、管道跨断层的交角、管道直径、壁厚、埋深、管道周围地基土剪切波速、断层错动量、断层类型、断裂缝宽度、管土摩擦角等。如果考虑初始应力,那么管内压、温度差、锈蚀程度等都会对分析结果造成一定程度的影响。

1991年,T. Ariman 和 B. J. Lee 考察了断层突发错动时,埋地管道拉裂失效的状况,建立了弹性半无限空间薄壁梁模型。利用非线性薄壳理论,从单轴拉伸试验中有效应力形成的角度引入了简易弹性流体理论,将管道弯曲曲率假设为定值,用修正的欧拉法解决管道受断层作用拉伸和弯曲反应。

1995年,Y. J. Chiou 等人研究了场地受压失效埋地管道的屈曲反应,通过改善管土作用模型,使管道在断层运动中受力反应理论分析更接近于真实情况。他们采用数值方法分别

对管道进行了梁单元模型和薄壳单元模型的屈曲分析,并建立了不同土体下管道径厚比与埋藏深度之间的关系,经与梁单元结构屈曲分析比较,将薄壳结构局部屈曲载荷临界值作为结构失稳的极限载荷,分析结果显示,基于薄壳单元模型的屈曲结果和实际的震例吻合得较好。

1999年,郭恩栋、冯启民利用有限元法,采取梁-土弹簧模型,并考虑土弹簧单元和梁单元的非线性特征,建立了断裂位移作用下管道和土弹簧的动力平衡方程,求解出连续渐变位移作用下管道及土体的反应状态,并证实王元等提出的抗震措施的正确性。

2001年,冯启民、赵林等考虑埋地管道与土介质的相互作用,分析了管道作为薄壳结构的断层位错反应。管道模型化为四结点薄壳单元结构,土介质简化为弹塑性弹簧,建立了管土相互作用的有限元分析模型。计算结果表明,在大位移断层运动作用下,埋地管道反应存在明显的非线性效应,断层类型、管道埋深等因素不能忽略,断层破碎带则无明显影响。

1.2.2 滑坡作用下埋地管道的反应研究进展

1.2.2.1 解析方法

解析方法一般把管子这种薄壳结构用索或梁模型简化后进行理论分析,该方法概念简单、计算方便,可以手算,便于工程实际运用。

1991年,梁政等人采用纵横弯曲弹性地基梁原理分析方法,讨论了纵向滑坡和横向滑坡作用下管线受力情况。该模型把滑坡段管道处理为悬跨段,两侧管道仍处于埋设状态。考虑了埋设管道弯曲变形对悬跨管道变形的影响。该方法有一定局限性,且力学公式过于简化。

1995年,Rajani等人采用简化方法分析管线在横向滑坡作用下的力学行为,模型中假定管线是埋于弹塑性土中的弹性钢管,管的位移未考虑管土相互作用,只研究无限宽横向滑坡情况,该方法得到管道变形量的解析解。

同年,O'Rourke等人采用Ramberg-Osgood模型进行管线应力、应变分析,提出了管土交界面力与变形的弹塑性模型。在此模型中,假定管土相对位移很小且不被考虑,得出管道最大应力随着埋设深度、土介质黏聚力、密度和摩擦角的增加而增加。证明了管线在拉伸状态下不易发生管壁破裂,如果管线没有初始缺陷,则受压状态下屈曲破坏被认为是它的失效模式。

1999年,Chan首次考虑管土相对位移对管线应力的影响,得出在3种典型滑坡下管线应变数学模型,并进行了管线可靠度分析。

2001年,张东臣等研究了当地滑力对管道的作用不垂直于管轴,也不沿管轴方向,而是与管道的轴心成一定角度的情况,得到管道受地滑力段中部位移,管道应力最大点位于受力段的端部。并分析了地滑力大小、作用力角度和受力管段长度等对管壁应力的影响,但未考虑管土相互作用。

目前国内还没有学者对管线在滑坡作用下破坏机理作系统的有限元分析,理论分析也不够成熟。

1.2.2.2 数值方法

解析方法将埋地管道模拟成梁或索,但计算结果不够准确,很难给出管道上应力细节分布。在滑坡的后期阶段,管道和土体的变形都要进入到非线性状态,当管截面存在大变形的

情况下,管内的轴向应变与弯曲应变相互影响,也就是说,不能简单叠加轴向应变和弯曲应变得到管的总应变,管子的轴力也不可以近似地用管子截面上正应力和管子截面积的乘积来计算。另外,在管道受滑坡作用的实际情况下,管还会出现应力残余和应力集中等现象,这些现象用理论分析方法都难以考虑。所以近年来有限元数值分析方法成为热点。利用有限元方法分析可以给出详细的管道应力场,计算结果较为准确。用三维有限元计算模型分析管土作用,便于观察分析管线的变形部位和变形大小,同时也可以了解管线对土体产生的影响。

2003年,王沪毅基于 Ranken 土压力理论,分析建立了土—管道的相互作用模型,采用有限元方法按接触问题进行计算,得出了不同坡度、不同长度的滑坡发生时管道的应力分布,并提出了防治的措施。

2004年,Hiroshi Yatabef 采用 Abaqus 软件分析弯管在永久地面大位移下的反应,Allen Jay 和 Evans 分别建立了二维和三维有限元管道模型,土体采用线弹性本构关系。

尽管国内外学者和工程人员对埋地管道在地震作用下的破坏机理研究方面取得了丰硕的成果,但还没有统一的埋地管道基于应变的抗震设计准则。2004年3月在北京召开的“中国石油管道技术与管理座谈会”的科研院所分组讨论会上,相关专家指出,基于应变的油气输送管道设计方法、理论是目前国外管道设计方法、理论的发展方向。随着越来越多的油气长输管线的铺设,特别在地面峰值加速度为 $0.4g$ 以上地区的管道建设,管道设计必须要考虑强震作用下因断层错动、滑坡和波动效应对埋地管道进入塑性状态的影响。另外,从国际上建筑物的抗震设计发展方向来看,人们不再满足于过去对建筑物的弹性设计,推出了塑性设计,继而提出极限状态设计(性能设计)的观点。埋地管线抗震设计的今后方向也将沿此发展下去。

1.2.3 沉陷区埋地管道的反应研究进展

1.2.3.1 试验方法

日本神户大学高田至郎在沉陷方面做了很多的试验和研究工作。他采用下沉土箱对有胶圈接头的地下聚氯乙烯管道的力学性能进行了试验,显示了管道在沉陷作用下的变形状态。1998年,他又对聚乙烯管进行了不均匀沉降实验,一条管径为 100mm 的供水 PE 管埋设在长 8m 、宽 2m 的土箱中,管子埋深 1.2m ,两端固定。土箱下为 4 张 2m 长桌子,使其中两张桌子下沉来模拟地面不均匀沉降,目的是得到土沉陷作用下聚乙烯管的力学强度基本数据。

试验结果表明,管子最大应力和最大应变都发生在相同点上;最大应变位于不连续界面附近,应力值将随离开不连续界面的距离增大而剧降;管道受到弯曲变形;顶部和底部的轴向应变、环向应变大于侧壁部位;管子最大应力与土沉降量之间有明显线性关系,沉陷量越大,管子最大应力也越大。试验结果充分显示了管道在沉陷作用下的变形状态。

1.2.3.2 解析方法

1996年,高惠瑛采用弹性地基梁模型,从变形模拟入手,考虑几何大变形,把管道变形模拟为 3 次曲线,建立管道受力分析平衡方程和内力计算递推公式,得出了受场地沉陷作用的埋地管线的内力及变形;她提出了新的变形模型,适用于距离交界面有限长度发生最大沉陷的情况。2003年,张土乔、李得浔、吴小刚对地基差异沉降时管道的纵向力学形状进行分析,得出沉降发生时纵向上力学性能如转角和弯矩等的一些结论。

S. Limurall 采用简便易行的解析方法依据文克尔地基梁理论,由已知的场地沉陷值推导

出管线应力求解公式, 并和弹性地基梁的有限元模型模拟结果相对照, 再针对沉陷的各类不同情况改进公式, 分别对沉陷情况下埋地管线部分、裸露部分以及介于二者之间的管线部分这 3 种状况进行了分析计算。

1.2.3.3 数值方法

随着计算机技术的快速发展, 近年来有限元等数值方法多被采用, 利用有限元方法分析可以给出详细的管道应力场, 计算结果较为准确。用三维有限元计算模型分析管土作用, 便于观察分析管线的变形部位和变形大小, 同时也可以了解管线对土体产生的影响。

有限元法是力学、应用数学与现代计算技术相结合的产物。实际上, 有限元法是一种对相关问题利用控制方程进行近似求解的数值分析法, 在数学上对其适用性、收敛性等都有较严密的推理和证明。和其他数值分析方法比较, 有限元法可以用于解决非线性问题, 易于处理非均质材料、各向异性材料, 能使用各种复杂的边界条件。埋地管线与土的相互作用恰恰存在着这几方面的问题, 因此很适宜采用有限元法。

2005 年, 饶鹏强用 ANSYS 软件对地面侧移作用下的埋地输水管道进行了二维分析, 得出管线剪应力和轴向应力分布, 并提出大量防御措施。Yun Meok Lim 等人根据土弹簧模型对管线在遭受很多不同情况下的地面永久位移时, 主要对管线最大应变值作了分析比较, 并研究了变形模式、管线长度、管径及管厚这些参数变化的影响。

现在的抗震规范和有关研究中, 还很少有估计管子内屈曲应变大小的方法, 这在管道抗震设计和工程上急需解决。实际上, 不可能对每一个大变形的管子做三维的壳模型有限元分析, 所以工程设计上需要一个简单易用又能够估计管子大变形的计算公式。并且应该注意到, 地面大位移对地下管线的影响与断层对地下管线的影响的分析有许多近似之处, 其地下管线的分析模型、破坏类型及抗震措施都有可借鉴之处。地下管线是一种特殊的地下结构, 周围受土介质约束, 其特性在很大程度上受土的限制。因此, 研究地面大位移对地下管线的反应分析是一个复杂的非线性问题。

采用 ANSYS 有限元软件, 建立地面大位移对地下管线破坏的非线性有限元计算模型, 计算地下管线的轴向应力应变和剪应力剪应变, 计算结果与相关震害相比较, 以验证该方法的正确性和有效性, 并分析沉陷区域长度和深度、土体的弹性模量、管线埋深、管径、管壁厚度等因素对地下管线抗震能力的影响, 为地面沉陷大位移区管线抗震设计和震后修复提供一定的指导。

但是, 由于地下管线抗震研究涉及土的非线性和管土相互作用等许多问题, 为了使结果更加科学可靠, 还要不断深入研究管土相互作用模型。

1.2.4 液化土中埋地管道的反应研究进展

早在 1973 年, T. L. Youd 对土壤液化定义后, 液化区管线的地震反应引起学者的关注。Neoark 和 Hall 等在 1975 年提出管线地震设计的概念, Trautman 等最早地对地下管线的上升力与位移响应做了研究。近几年来, 国内外的一些学者对液化场地地下管线进行了研究, 包括试验研究、理论分析以及实际震害调查。

1.2.4.1 试验研究方面

在试验研究方面, 1998 年, 日本北浦胜^[26]等用圆橡胶棒模拟地下管线对液化过程中地下管线的反应特性进行了模型试验研究。输入波有两种形式: 一种是稳态谐波和波; 另一种是

振幅由零直线上升到一定值后保持恒定的渐变谐和波。激振方向也有两种：沿管轴方向和垂直于管轴方向。

吉田和泊野等通过桩和砂层的模型振动试验也都曾指出过在不完全液化和砂再沉积时出现最大动应变反应这一特点。北浦胜把液化土中管线应变的产生机理分为两类：管线振动产生的动应变和由于上浮影响管线弯曲产生的积累残余（静）应变。由于这个试验更侧重于动应变的研究，而实际震害大多数是与静应变有关的管线上浮造成的，因此，提出对静应变进行研究是很有必要的。

高田至郎^[27]为了取得用于地下管线液化分析的浮力、外力及等效弹簧常数，也利用振动台进行了地下管线模型的稳态谐波试验。通过实验结果并按照弹性地基梁理论分析解相结合，提出建议：在液化土中的管线设计中可取等效弹簧常数为非液化土中的 $1/3000 \sim 1/1000$ 。

Nishio^[28]等做了部分砂土液化时，埋在强表土中的管线反应的试验，他们用的试验模型是一个下设有易液化砂土，表面铺设非液化土并在其中埋设管线的砂箱。同时根据实验模型建立了计算模型，通过实验和计算结果的比较，证明了计算模型的合理性，通过实验分析和理论计算，得出在部分液化状态下，管线会发生相当大的应变，特别是在大管径时；在非液化区与液化区交界处，管线应变最大，当考虑滑移后，管线的应变将大大降低，并给出了判别滑移的依据。

Koseki 等^[29]在 1997 年也开始研究管线上浮机理问题。他们做了部分和全部埋置的箱体结构、下水道检修口和管道的振动台试验。结果表明，超孔隙水压力增加时时，砂土的侧向流动导致管线的上浮，据此提出了抗上浮安全系数的概念。

Towhata 于 1999 年进行了振动台模型试验，研究液化土中管线的反应。试验采用了钢模型槽，长度为 70cm，宽 40cm，高 40cm。地基分别采用了干的 Toyoura 砂和饱和的 Toyoura 松砂。模型管采用钢管，长 30cm，直径 3cm。振动过程中，监测了管线的上浮力，并根据测试结果得到了液化砂的黏性力。

Mohri 等进行了一系列 1g 的振动台试验来检验饱和砂土中管线的抗震措施。试验采用直径为 30cm 的 PVC 管线，管线埋置在砂土地基以下 40cm。管线在静力条件下有足够的抗上浮安全系数。当振动台输入峰值加速度为 0.3g 的正弦波时，管线浮到地表面。因为液化使砂土呈流态，其抗剪强度消失。

Ling 等使用 100g 的离心模型试验模拟砂土液化时的管线上浮过程。在研究中制作了一个剪切箱，长度 71cm、宽度 35.5cm、高度 35.5cm，模型管线采用直径为 10cm 的铝管，Nevada 砂用来模拟地基。为了解决动力和扩散现象时间比尺的冲突，采用了纤维溶液来模拟孔隙流体。在试验中采用土工布包裹的碎石减轻上浮。通过对砂土地基的加速度和超孔隙压力、管线的上浮、土压力、地基的变形进行分析，建议了地下管线抗液化上浮的简化设计方法。研究表明，土工织物约束的碎石自重和刚度在设计中是很重要的因素。

邹德高、孔宪京等（2002）采用模型试验技术，证实了地震中由于地基的液化使管线上方的填土抗剪强度降低，浅埋在饱和砂土下的管线“上浮”到地面，最终导致管线破坏；通过类比试验研究的方法，着重研究了地震时砂土地基的加速度反应、振动孔隙水压力的产生和消散过程、管线的上浮机理、多种排水措施的抗震效果，为进一步深入研究、数值分析提供了依据。

1.2.4.2 理论研究方面

Yang 和 Wang (1985) 用两种不同的弹性地基土, 以简化梁模型模拟地下管线, 以有限差分法分析管线动应力^[30]。Kitaura 和 Miyajima (1985) 考察了因下部土层液化而发生横向扩展的强表土中的管线横向和弯曲应变^[31]。分析结果表明, 管中的轴向和弯曲应变均随土的弹性系数的增加而增加, 随发生横向扩展的地面尺寸的减少而增大。

Nishio (1989) 用弹簧质量模型分析认为, 因土壤液化产生的动应变使管线破坏, 当土壤移动时动应变减少, 且随着管径的增大而减小^[32]。在非液化与液化交界处, 管线应变最大, 当考虑滑移后, 管线的滑移将大大降低, 并给出了判别滑移发生的依据。

王汝樑 (1990) 等^[33]采用了一个更为接近实际的阻尼值, 分析了在液化情况下有人孔埋设管线的水平反应。1994 年, 王汝樑等又考虑土的弹塑性本构关系, 采用弹性地基梁模型来建立微分方程, 由传递矩阵法分解微分方程, 得到各节点的位移方程, 从而进行管线液化反应分析^[34]。

甘文水、侯忠良 (1991) 将管线简化为地基梁, 采用增量有限元方法对液化土中的管线进行上浮反应分析^[35]。同年, 侯忠良等^[36]采用 FROP-2 程序对常用输油管线的液化上浮反应建立了简化计算公式, 并给出地表非液化土对上浮反应限制作用的计算方法。

Kitauro 和 Miyajima^[37]先用有限元法分析土中的超孔隙水压力的变化, 然后借助此超孔隙水压与土中弹性系数的关系确定管线分析中土对管线的作用力, 该方法对土的液化进程作了较细的考虑。Takada、Suzuki 等提出了液化场地中管线横向扩展时弹塑性变形的简便判别方法^[38], 此方法所得结果与有限元方法得到的结果吻合很好。

林均岐、熊建国 (2000) 利用虚功原理, 建立了液化场地土中埋设管线的上浮反应分析模型^[39]。考虑到土的非线性约束作用和管道的初始轴力的影响, 采用非线性增量有限元法, 分析了液化场地土中埋设管线的上浮反应。

林均岐、李祚华 (2005) 等^[40]通过数值分析对场地土液化引起的地下管道上浮的影响因素进行了较为全面的研究。包日东、闻邦椿 (2008) 采用梁模型一般振型函数实施模态叠加法对液化区埋地管道进行地震响应的动态分析, 探讨了管道、流体和液化土参数对管道上浮反应的影响^[41]。

综合目前国内外关于液化土中埋地管线的地震反应方面的研究, 对液化引起的管线上浮反应、液化土与管线的相互作用系数等都进行了相关的振动模型试验研究, 取得很多有用的结果。对液化过程中管线反应的基本特征和机理进行了探讨, 也对影响管线反应的诸多因素进行了研究, 并提出了一些改善管线反应的有效措施。由于液化土中管道的响应分析问题非常复杂, 有些问题如管土相互作用的系数, 特别是土弹簧的刚度如何正确选择才能更加符合工程实际, 孔隙水压力对管道上浮反应的影响以及如何建立一个更为准确、合理的分析模型等都有必要在前人研究的基础上做进一步的探讨分析, 并由此提出液化土管道的抗震措施。另外, 前人研究的结论并不是完全一致的, 由于问题的复杂性, 有必要做更深一步的研究。

1.2.5 地震波作用下埋地管道的反应研究进展

地震振动波传播对位于均匀坚固土壤中的地下管线的震害影响相对较小, 但影响区域较大。1971 年美国圣费尔南多地震中, 多数地下管道的破坏是由地震的波动效应造成的, 1985 年墨西哥城地震及 1987 年美国惠蒂尔纳罗斯地震中埋设管线的震害也主要与地震振动

效应有关。关于地震波作用下埋地管道的地震反应分析,国内外学者做了大量的工作。

1967年, Newmark 提出了地下管道在波的作用下的分析方法^[42]。此法假定管与土的运动完全一致,即共同变形。这种方法提供了一个估计管道应变的上限值,当管与土之间产生滑移时,此法是很保守的。

20世纪70年代,日本学者提出了管线与土相互作用模型,该模型将管线简化为弹性地基梁,管道与土之间视为弹簧连接,将地震波简化为简谐波,通过土体波动位移计算管道变形,即反应位移法。目前,日本的有关规范大都基于该方法。

许多学者利用在弹性介质中的圆柱壳模型对地下管道的动力反应分析进行了研究。H. Garnet (1966)、Y. H. Pao (1973) 等分别研究了圆柱壳在无限弹性介质中对入射的纵波和剪切波的二维反应分析(平面应变问题)。Parmelee 和 Ludtke (1975) 则首次将管线简化为半无限空间中的圆柱壳,土与管线之间相互作用采用静态 Mindlin 解来求解,为后来的半无限空间理论和相互作用奠定了基础^[43]。

王汝樑 (1978) 基于对震害的分析和试验研究,提出了一种简化的准静力分析方法,该方法忽略了埋地管道惯性力和阻尼力的影响^[44]。通过对埋地管道轴向反应位移的研究,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,这与震害调查结果是一致的^[45]。

A. Hindy 等^[46]应用管道集中质量模型,得出管道轴向应力大于弯曲应力,管和土动力相互作用可以显著降低管道的轴向应力,柔性接头可以大幅度降低管道应力。F. C. Owens^[47]采用集中质量模型,用时程分析,得到不同边界条件下管道的各种应力,分析结果显示接头有较大位移。

Takada (1987) 采用传递矩阵法对管线进行了三维拟静态分析^[48],同时考虑了接头的非线性和土与管线之间的滑移。1990年, Takada^[49]又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。

熊占路 (1987) 采用离散的梁元模型对管线进行地震反应分析^[50]。结果表明,地震波频率含量对管线应力影响很大,低频波会产生更大的应力。谢旭、何玉傲^[51]通过面波原理计算埋设管线通过不均匀场地的地震反应,根据在不连续面上的应力、变形连续条件及正交关系确定反射波和透射波,应用弹性地基梁模拟管线与土的相互作用。

林惠杰、胡聿贤 (1990) 利用离散管道模型计算了二维非均匀土中埋设管道的地震反应^[52]。梁建文、何玉傲 (1994) 分析求解了半无限空间中通过不均匀介质管线的反应^[53],发现不均匀介质中管线应力可达到均匀介质中管线应力的两倍以上,而当波从硬土到软土时,管线应力最大。曲铁军、王前信 (2003) 将地面运动看作在时间和空间上分布的随机过程,用级数解法求解管道的地震反应^[54]。

1.3 地下管道抗震可靠性研究进展

对于埋地管道震害的研究主要有两类方法:一是依赖于震害实例统计的经验法;二是从管道的地震反应机理出发的理论计算方法。

1.3.1 经验统计法研究进展

经验统计法的基本思想是区分场地条件、管道类型、接头形式、破坏形式、管道直径等多

种因素,建立单位长度内管道的平均破坏率与影响因素之间的函数,并利用历史震害资料综合统计给出这类函数中的经验系数,并用之于地下管线震害率的估计或抗震可靠度计算^[55]。

假设地震时沿管段 l 的震害发生是随机独立的,且服从泊松分布,则管段 l 的两种状态的概率为

$$P_s = \exp(-R_l \cdot l) \quad (1.1)$$

$$P_f = 1 - \exp(-R_l \cdot l) \quad (1.2)$$

式中, P_s 和 P_f 分别为管段 l 完好状态和破坏状态的概率; R_l 为平均震害率,用每千米内的破坏处数表示; l 为同一场地某种类型的管线长度。

地震造成的埋地管道的安全性和安全性评价的关键是震害率的确定。早期的研究中,因缺少找出确切关系的充足资料,多采用地震烈度作为地震动强度参数。Bresko 等 (1981) 建立了震害率 R_l 与烈度的近似公式^[56],即

$$\lg R_l = 3.65 + 6.39(-2.98 + 0.30I) \quad 7 < I < 8 \quad (1.3)$$

$$R_l = 2.0 \quad I = 9 \quad (1.4)$$

$$R_l = 32.0 \quad I = 10 \quad (1.5)$$

式中, I 为场地烈度。

20 世纪 80 年代末,Shinozuka 等在对美国 Memphis 市的供水管网进行抗震分析时,采用了一种结合专家意见和历史震害得到的震害率简化计算公式^[57]。该经验方法选取地震烈度、管径和场地条件等 3 个影响因素进行了管段震害率的计算,即

$$R_l = C_d C_g 10^{0.8(MMI-9)} \quad (1.6)$$

式中, MMI 为修正的 Mercalli 烈度 (参照意大利麦卡尼 Mericalli 制定地震烈度表); C_d 为管径影响系数; C_g 为场地土影响系数。

王东炜 (1991) 根据中国、日本、美国、墨西哥各国震害资料分析得到管道震害率 R_l ,并注意尽量排除环境破坏、严重腐蚀等因素造成的震害率的离散性,在没有充分资料的情况下,可取其所给出的震害率的建议值^[58]。

邓民宪 (1998) 根据多次历史地震埋地管道震害调查资料的统计和定性分析,应用灰色系统理论,对埋地管道震害率进行了多因素灰色关联分析,排出了关联序^[59]。研究结果客观地揭示出震害率与各影响因素之间的相互关系,为进一步研究埋地管道的震害预测方法提供了科学依据。

由于地震烈度不是一个物理量,而只是一个宏观的、综合的、粗略的等级。而且,地震烈度等级的评定存在模糊性,有些地震学家按照烈度表的规定,根据场地震害确定震中烈度;有的工程师则从振动效应分析,根据房屋或其他工程结构的破坏情况评定震中烈度,以致同一个地方评定出不同的地震烈度^[60]。因此,学者们开始基于 PGA、PGV 和 PGD 等地震动参数分析管道的震害。

Isoyama 和 Katayama (1977)^[61] 用 1923 年日本关东大地震和 1971 年美国旧金山大地震中管道破坏的数据,研究了供水管线的破坏率与地面峰值加速度、场地条件及管径的关系,并将这一关系应用于 1978 年京都地震管道破坏的估计。后来, Isoyama 和 Katayama 根据震害资料统计的管道基本破坏率,提出了一个改进的关于埋地管道破坏估计的公式^[62],即

$$R_m(a) = C_1 C_2 C_3 \cdots C_n R(a) \quad (1.7)$$

式中, $R_m(a)$ 为修正后的破坏率 (破坏处数/km); $C_i (i=1, 2, \cdots, n)$ 为各条件因子; a 为