

SEISMIC ANALYTICAL METHOD AND APPLICATION
OF BURIED PIPELINE

地下管线抗震

计算方法与工程应用

冶金工业部建筑研究总院防灾抗震工程研究所

一九九一年十一月

地下管线抗震

计算方法与工程应用

主 编： 侯忠良

副 主 编： 肖五虎 刘学杰

编 委： （以姓氏笔化为序）

王 筠 刘学杰 李鹏程

肖五虎 杨广智 侯忠良

责任编辑： 刘学杰 王 筠

前 言

地下管道在输水、油、气(汽)、煤以及通信、供电、交通、运输和排水等工程方面,在我国得到广泛地应用,已成为工业生产和城市生活的最重要的工程设施之一,因此人们常称之为地下生命线工程。随着城市经济发展和工业生产、交通运输的现代化,地下管道在选线、设计、施工、维修或改造等方面将提出更多更高的要求,其中有关抗震防灾课题在上述各个环节中都是十分重要的内容。1975年2月4日,中国海城地震(7.3级),营口市(8度)150多公里管道破坏372处,平均破坏率2.4处/km,经一个多月抢修才恢复正常供水;盘锦地区(7度区),直埋大口径钢管66.5km,焊口断裂21处(破坏率0.31处/km),丝扣连接的小口径管道破坏率为16处/km,铸铁管道的破坏率为0.8处/km;辽河油田的14条输油管线断裂29处,因中断输油迫使鞍钢部分停产。1976年7月28日唐山地震(7.8级),唐山市给水系统全部瘫痪,经两个多月抢修仍主要依靠地面临时供水,部分地区采用水车定点定时送水;天津市(7~8度,Ⅲ类场地),管道平均震害0.81处/km,塘沽区(8度区,Ⅲ类场地)4.18处/km,汉沽区(9度,Ⅲ类场地)10处/km,唐山市(10~11度,Ⅱ类场地)4.0处/km;秦皇岛-北京输油管线发生5处破坏,除一处因滦河大桥倒塌而造成桥上跨越管线破坏外,其余4处基本上发生在7度区(其中野鸡坨余震烈度为8度),造成原油流失1万吨,污染了农田和滦河,经一个多月抢修才恢复生产。国外有关地下管线的震害及其危害实例也很多。例如:1971年美国圣费尔南多地震,地下煤气管道发生450处破坏,给居民生活和工业生产造成严重危害;1923年日本关东地震(7.9级),由于供水中断,大火连续烧了三天两夜,约36km²的市区被烧毁,3.2万人被烧死或窒息而死,占该次地震死亡人数的1/3。由此可见,地震能在较大范围内造成各种地下管线的全面破坏,甚至对质量很好的16Mn钢管道(秦京输油管线)在7度地震时就可造成严重破坏,这不能不引起人们的关注。因此,近十几年来国内外不少地震工程学者对地下管线的抗震分析方法、震害预测方法和提高管道抗震性能的措施等方面,开展了震害调查和分析,建立各种力学模型和计算方法,进行了模拟试验和现场测试。中国学者于70年代初也开展了理论与试验研究,并于1978年首次制订了国家标准《室外给水排水和煤气热力工程抗震设计规范》(TJ32-78)。

1983年以来,冶金工业部建筑研究总院防灾抗震工程研究所在以下几方面做了一些研究工作,并把这些研究成果应用于多项实际工程中。

1. 地震行波作用下的地下管线反应计算方法及其程序编制；
2. 液化土中管线的上浮反应计算方法及其工程措施；
3. 断裂位移作用下地下管线反应计算方法及其程序编制；
4. 地下管线的震害分析与计算；
5. 地下管网震害预测方法及其抗震对策；
6. 管道及其接口的模拟（或模型）试验；
7. 地下管线抗震分析方法在实际工程中的应用和抗震措施设计。

在以上问题的研究和实践中，得到日本神户大学高田至郎教授，美国王汝梁教授，冶金工业部抗震办公室姚伯英副主任，大连理工大学力学系郭瑞峰、曲乃泗教授、王扬讲师，中国石油天然气总公司王优龙、李康祺、陈冠卿、张怀法等高级工程师，北京市政工程研究所孙绍平所长，北京市政设计院沈世杰副总工程师，中国地质大学（北京）彭一民教授、孙进忠讲师，天津大学何玉敖教授、杨琳讲师，陕西机械学院谢定义教授，西安冶金建筑学院童岳生教授，中国地质大学（武汉）蔡建原讲师，包钢公司范振刚、杨志豪、程茂辉、以及冶金工业部建筑研究总院刘惠珊、王余庆教授级高工、张维全工程师等，给予了指导和帮助，在此致以衷心的感谢和良好的祝愿。

出版这本研究成果汇编的目的，是为了交流地下管线抗震分析方法及抗震对策的研究成果，以促进我国在这方面的研究工作向更全面、更可靠、更适用的方向发展；同时，也为工程设计和鉴定人员提供一些计算方法和抗震对策，以促进城市和企业的抗震防灾的基础工作。

编者

1991年10月15日于北京

FOREWORD

The book covers a wide range of information on lifeline earthquake engineering, which include the seismic response of under and above ground pipelines, test analyses on performance and seismic response of buried pipeline, as well as method for seismic risk analyses of lifeline network subjected to progressive wave and permanent ground deformation. Moreover, the application of network reliability theories to lifeline earthquake engineering and seismic capacity appraisal of buried pipeline in Steel-Iron Incorporation as well as the application programs are introduced. All these are completed by researchers in our institute during the past five years.

Steering Editor: Hou Zhongliang

Excutive Editors: Liu Xuejie
Wang Yun

Nov.15, 1991

目 录

一、地下管线在地震作用下的反应分析	
1 中国地下管线地震反应研究	1
2 地下通廊的抗震计算	13
3 地震行波作用下埋设管线的反应计算	21
4 地下管线抗震计算的震源输入法及三维反应分析	28
5 加热输油管线地震反应分析	38
6 秦京输油管线屈曲震害实例分析	43
7 场地断裂位移作用下埋设管线的反应分析	53
二、地下管线液化反应分析	
1 液化土中地下管线的上浮反应	61
2 埋地管渠结构的地震液化危害分析及抗震加固措施	66
3 输油管线地震液化反应计算	72
4 砾石排水后地下结构的液化反应	77
三、地下管网的震害预测	
1 地下管网震害预测与抗震对策	87
2 Monte Carlo 法分析地下管网系统在地震作用下的服务能力	95
3 供水管网系统的可靠性分析	104
四、地下管线的试验研究	
1 地下管线地震反应的超声模拟研究	109
2 铸铁管承插口接头性能的试验研究	122
3 T型三通焊接钢管模型电测应力分析	132
4 输油管线液化反应的实验研究	147
五、工程应用实例	
1 BC 黄河水源供水系统抗震鉴定与抗震加固设计	158
2 包头钢铁公司地下管网震害预测与主干线抗震鉴定	165
3 宝钢工程地下管道系统主干线抗震分析研究与实践	177
4 秦京输油管线的抗震鉴定	189
5 太钢供水干线抗震鉴定与试验研究	195
六、抗震鉴定与措施	
1 地下管线系统抗震鉴定与措施	201
2 生命线工程的抗震减灾措施	205
七、地下管线、管网抗震计算ROBP系列程序简介	
1 地震行波作用下地下管线三维反应计算程序 (ROBPP)	210
2 “震源输入法”计算程序 (ROBPS)	211
3 液化土中管线上浮计算程序 (ROBPL)	211
4 断裂位移作用下管线反应分析计算程序 (ROBPF)	212
5 地下管网震害预测和修复、改造对策程序 (ROBPN)	212
八、索引	214

CONTENTS

RESPONSE ANALYSIS UNDER SEISMIC PROGRESSIVE WAVE

A REVIEW OF SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF BURIED PIPELINE IN CHINA

Hou Zhongliang1

ASEISMIC CALCULATION OF UNDERGROUND CORRIDOR

Hou Zhongliang13

ANALYSIS OF BURIED PIPELINE RESPONSE TO SEISMIC WAVE PROPAGATION

Gan Wenshui and Hou Zhongliang21

THREE DIMENSION RESPONSE OF BURIED PIPELINE BY SEISMIC PROGRESSIVE

Gan Wenshui, Hou Zhongliang, Li Pengcheng28

SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF HEATING OIL PIPELINE

Hou Zhongliang, Gan Wenshui, Xiao Wuhu 38

ANALYSIS ON BUCKING OF BURIED PIPELINE IN TANGSHAN EARTHQUAKES

Hou Zhongliang, Li Pengcheng, Yang Guangzhi.....43

RESPONSE ANALYSIS OF BURIED PIPELINE ACROSS FAULT

Gan Wenshui, Hou Zhongliang, Xiao Wuhu..... 53

SEISMIC RESPONSE IN A SOIL LIQUEFACTION ENVIRONMENT

UPLIFTING RESPONSE OF BURIED PIPELINE IN A SOIL LIQUEFACTION ENVIRONMENT

Gan Wenshui, Hou Zhongliang61

LIQUEFACTION HAZARDS ANALYSIS AND ASEISMIC REINFORCING MEASURES OF BURIED PIPELINE AND CHANNEL STRUCTURES

Song Bo, Liu Huishan, Hou zhongliang66

ANALYSIS FOR EARTHQUAKE LIQUEFACTION RESPONSE OF PETROLEUM PIPELINE

Hou Zhongliang, Cai Jianyuan, Liu Xuejie72

LIQUEFACTION ANALYSIS FOR BURIED STRUCTURES COUNTERMEASURES BY GRAVEL DRAIN

Shiro Takada, Sun Jiansheng, Koji Yagi77

SEISMIC DAMAGE ESTIMATION

SEISMIC DAMAGE ESTIMATION AND OPTIMUM RECOVERY PRINCIPLE OF WATER SUPPLY NETWORK

Liu Xuejie, Hou Zhongliang87

ESTIMATION OF SERVICEABILITY OF UNDERGROUND PIPELINE NETWORK SYSTEM

Wang Yan, Wu Ruifeng, Hou Zhongliang95

RELIABILITY ANALYSIS OF WATER SUPPLY SYSTEM

Li Pengcheng, Yang Guangzhi104

TEST ANALYSIS OF BURIED PIPELINE

ULTRASONIC SIMULATION ANALYSIS OF BURIED PIPELINE Hou Zhongliang, Peng Yiming, Sun Jinzhong	109
TEST ANALYSIS ON JOINT PERFORMANCE OF CAST STEEL PIPE Xiao Wuhu, Yang Ling, Wang Yun, He Yu'ao	122
TEST RESEARCH ON TEE-JOINT PERFORMANCE OF WELDING STEEL PIPELINE Yang Ling, Xiao Wuhu, Hou Zhongliang, He Yu'ao	132
TEST ANALYSIS OF BURIED PIPELINE IN A SOIL LIQUEFACTION ENVIRONMENT Cai Jianyuan, Liu Xuejie, Hou Zhongliang, Cheng Guangqing	147

APPLICATION IN PRACTICAL ENGINEERING

ASEISMIC APPRAISAL AND REINFORCING DESIGN OF YELLOW RIVER WATER SUPPLY SYSTEM IN B. C. IRON-STEEL COMPANY Hou Zhongliang, Gan Wenshui, Song Bo	158
SEISMIC DAMAGE ESTIMATION AND ASEISMIC APPRAISAL OF BURIED LIFELINE SYSTEM IN BAOTOU STEEL-IRON COMPANY Liu Xuejie, Xiao Wuhu	165
ASEISMIC APPRAISAL OF MAIN PIPELINE IN BAOSHAN STEEL-IRON INCORPORATION Xiao Wuhu, Wang Yun, Liu Xuejie, Hou Zhongliang	177
ASEISMIC APPRASIAL OF PETROLEUM PIPELINE LOCATED IN BEIJING AND QINHUANGDAO Hou Zhongliang, Gan Wenshui, et al	189
ASEISMIC APPRAISAL OF BURIED PIPELINE IN TAIYUAN STEEL-IRON COMPANY Xiao Wuhu, Hou Zhongliang	195

ASEISMIC APPRAISAL AND MEASURE

SEISMIC EVALUATION AND MEASURES OF EXISTING BURIED PIPELINE SYSTEM Hou Zhongliang, Shen Shijie	201
MEASURES FOR EARTHQUAKE RESISTANCE AND DISASTER REDUCTION OF LIFELINE Hou Zhongliang, Gen Shujiang	205

INTRODUCTION OF PROGRAMS

RESPONSE OF BURIED PIPELINE UNDER SEISMIC PROGRESSIVE WAVE	210
RESPONSE OF BURIED PIPELINE CONSIDERING VIBRATION ATTENUATION	211
UPLIFTING RESPONSE OF PIPELINE IN A LIQUEFIED SOIL.....	211
RESPONSE OF BURIED PIPELINE ACROSS FAULT	212
SEISMIC DAMAGE ESTIMATION OF UNDERGROUND PIPELINE NETWORK.....	212

INDEX

SHOW THE SOURCE OF EVERY PAPER IN THE BOOK.....	214
---	-----

中国地下管线地震反应研究

侯忠良

(冶金工业部冶金建筑研究总院)

中国地下管线地震反应研究始于1974年。1975年叶耀先、魏琰等^[1]通过直管和弯管管沟不同回填方式下爆炸振动实验,探讨了管土间的共同变形问题,以及管沟用松散介质回填时对管线受力的影响。试验表明,回填松散(软)介质时,管土间出现相对位移,使直管轴应力明显下降;夯实回填时,管土之间接近共同变形的假定,直管轴应力相应较大。提出了在纵波、横波作用下管线地震应力计算公式。认为直管的弯曲应力可按管土横向共同变形假定计算,当管径较小时可忽略弯曲应力;为使弯管的总应力不应超出相应的直管的轴应力,建议满足下式要求: $\sigma_{im} < 0.6\sigma_{am}$ (式中 σ_{im} 、 σ_{am} 分别为弯曲应力和管土共同变形时的直管轴应力)。

孙绍平等通过各种刚性、柔性接头的大量实验,为编制我国地下管线抗震设计规范(TJ32-78)^[2]提供了校核准则,并研制了已经广泛应用的柔性接头。他还与美国王汝梁合作在唐山的工程管线上设置强震观察仪,以实测管线的地震反应。

由沈世杰主编的《室外给水排水和煤气热力工程抗震设计规范》(TJ32-78)是我国第一本地下抗震设计规范。该规范的计算方法是应用波动理论并仅考虑剪切波对长直管线引起的轴应变(应力),应用半经验法考虑管土间的弹性相对位移,通过场地土层的平均剪切波速取代土的弹簧刚度系数。应用规范方法计算有接口直管线的应变,并运用该规范给出的接口允许应变值,所设计的有接口管线是基本安全的。但对于钢管线,规范方法计算结果则极为偏小,偏于不安全,问题出在半经验方法计算出的传递系数过小。

从80年代开始,中国的地下管线地震反应分析研究得到了迅速发展,提出了一系列较精确的计算分析方法。

1.熊占路^[3]用离散的梁元模型建立运动方程,同时考虑横向和纵向振动对地下管线作了动应力分析。设长度为L的管段,分为若干个梁单元1,平面地震波速度v与管线呈 φ 角传播,以集中质量法将管段质量集中于节点上,组集成质量矩阵[m],各节点的绝对位移矢量{v}为:

$$\{v\} = \{v_s\} + \{u\}$$

式中 $\{v_s\}$ —地震位移矢量;

$\{u\}$ —管道各节点相对于土的位移矢量;

则运动方程为:

$$[m]\{v\} + [C_p]\{v\} + [K_p]\{v\} + [C_s]\{u\} + [K_s]\{u\} = 0 \quad (2)$$

式中 $[C_p]$ 、 $[K_p]$ —管道的阻尼、刚度矩阵； $[C_s]$ 、 $[K_s]$ —土体的阻尼、刚度矩阵。

设 $[K] = [K_p] + [K_s]$ ，则以相对位移表示的运动方程为：

$$[m]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[m]\{\ddot{v}_j\} - [K_p]\{v_j\} \quad (3)$$

式中 $\{v_j\} = [v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{nj}]^T$ ， v_{1j} 、 v_{2j} 、 $\dots$ 、 v_{nj} 分别为各节点在同一时刻的地震位移。

分别输入地震加速度时程和位移时程的计算表明，地震位移比地震加速度对管道动应力的影响大；同时还得出如图 1 所示的管道动应力的影响因素。

2. 谢旭、何玉敖^[4]通过面波原理对穿过软、硬不同地基土的管线作了反应分析，根据处于非连续介质地基中的应变（或变形）协调条件和正交关系决定反射波和折射波，应用弹性地基梁模拟管线与土的相互作用，建立简化的解析方法，应用该方法并输入 IMPERIAL VALLEY 地震记录（地面水平位移幅值取 5.45cm，竖向取 2.8cm，时间间隔取 0.02 S，取地震记录的前 10.22 S），管径为 $\Phi 1400\text{mm}$ ，土的弹簧系数 $K_1 = K_2 = K_3 = 3G$ 。土的物理参数列于表 1，分别对图 2 所示的 4 种情况的计算结果列于表 2 中。

表—1. 土的物理参数

土类	$V_p (\text{m/s})$	$V_s (\text{m/s})$	$G (\text{N/m}^2)$	$\rho (\text{kg/m}^3)$
粘土	145.0	301.8	3.39×10^7	1.58×10^3
粉砂	185.0	308.8	6.85×10^7	1.96×10^3
片麻岩	500.0	935.4	7.0×10^8	2.80×10^3

表—2. 计算结果 (N/cm^2)

	a	b	c	d
最大拉应力 σ_p	2.351×10^4	2.14×10^4	1.29×10^4	1.12×10^4
最大压应力 σ_s	1.46×10^4	1.35×10^4	0.82×10^4	0.60×10^4

3. 王海波、林皋^[5]采用边界单元法确定了三维弹性半空间中管与土的动力相互作用，并求得管线在地震波作用下的反应（表 3、4）。算例中按无限长的埋管考虑，即把 n 值取大一些（图 3）。取 $l=2\text{m}$ ， $n=100$ ，管外径 $R_o=0.25\text{m}$ ，内半径 $R_i=0.24\text{m}$ ， $E=2.1 \times 10^5\text{MPa}$ ，管密度 $\rho=7800\text{kg/m}^3$ ，土的剪切波速 $V_s=100\text{m/s}$ ，土的泊松比 $\nu=0.3$ ，土的密度 $\rho=1800\text{kg/m}^3$ ，管埋深 $D=5\text{m}$ ，管端设为自由端，地震波入射角 $\beta=0^\circ$ 。采用 Lower California Earthquake, Dec 30, 1934-0552PST, El Centro, Imperial Valley, Comp. N90E，相应的最大地面加速度、速度、位移是： $-179.1 \times 10^{-2}\text{m/s}^2$ ， $-11.5 \times 10^{-2}\text{m/s}$ ， $-5.07 \times 10^{-2}\text{m}$ 。地震记录取 1024 个点， $\Delta t=0.02\text{s}$ 。

表一3. 管轴向应变幅值及考虑相互作用后的应变降低百分比

时刻	2.50	3.30	3.71	5.02	5.44	7.64	8.50	9.00	9.78	10.30
无相互作用(10^{-4})	-4.21	-6.22	2.99	6.11	-5.28	-3.65	3.82	3.43	-4.60	-4.37
有相互作用(10^{-4})	-3.30	-4.62	2.08	4.36	-2.89	-2.61	3.23	2.78	-2.38	-3.05
有相互作用 无相互作用	78.4%	74.3%	69.6%	71.4%	54.7%	71.3%	84.0%	81.0%	51.7%	69.8%

时刻	10.50	11.04	11.24	12.60	15.30	15.90	17.44	17.74	19.10	19.94
无相互作用(10^{-4})	-5.16	-3.72	-3.30	-2.78	4.54	2.99	-4.33	3.77	-3.61	3.40
有相互作用(10^{-4})	-2.95	-2.65	-2.63	-2.05	2.59	2.41	-3.03	2.33	-3.17	2.63
有相互作用 无相互作用	57.2%	71.2%	79.7%	74.1%	57.0%	80.6%	70.0%	61.8%	87.8%	77.4%

表一4. 管弯曲应变及考虑相互作用后的应变降低百分比

时刻	2.06	3.14	3.50	4.70	4.88	5.30	5.42	8.54	9.62	9.72
无相互作用(10^{-5})	2.05	3.54	-2.13	2.77	-3.87	2.23	-2.89	2.12	2.72	-2.81
有相互作用(10^{-5})	2.05	3.09	-2.13	2.26	-3.64	2.22	-2.83	2.00	2.46	-2.59
有相互作用 无相互作用	100%	87.0%	100%	81.0%	94.0%	99.8%	97.9%	94.3%	90.4%	92.2%

时刻	10.36	10.46	12.62	12.76	14.70	14.86	15.14	15.30	17.60
无相互作用(10^{-5})	2.81	-3.78	-2.54	2.49	-2.73	2.79	-4.48	3.83	-2.00
有相互作用(10^{-5})	2.42	-3.60	-2.35	2.33	-2.47	2.39	-3.20	3.42	-1.95
有相互作用 无相互作用	86.1%	95.2%	92.5%	93.6%	90.5%	85.7%	71.4%	89.3%	97.5%

作者方法还与假定土为 Winkler 介质时的静力计算结果作了对比(表一5)。

表一5. φ_1 随 V_s 的变化 $f=5\text{Hz}$

剪切波速(V_s)	100	200	400	600	800
φ_1	0.276	0.8585	0.9898	0.998	0.9993
动力数值结果	0.276	0.7985	0.9813	0.9959	0.9986

静力无量纲位移公式为:

$$\text{纵向} \quad \varphi_1 = \frac{1}{[1 + \frac{EF}{K} (\frac{2\pi}{L})^2]} \quad (4)$$

$$\text{横向} \quad \varphi_2 = \frac{1}{[1 + \frac{EF}{K} (\frac{2\pi}{L})^4]} \quad (5)$$

作者对管应变、位移的影响参数作了分析:

(1). 频率的影响. 在简谐波作用下, 管与土的位移完全一致时, 纵向和弯曲应变幅值为:

$$\delta_p = \frac{2\pi f A_0}{V_p} \quad (6)$$

$$\delta_b = \frac{R_p 4\pi^2 f^2 A_0}{V_p^2} \quad (7)$$

式中 f —波的频率;

A_0 —位移幅值.

图 4 中给出管位移无量纲幅频曲线. 可以看出位移随频率单调减小, 没有明显共振峰. 纵向位移比横向位移小, 说明纵向相互作用影响大. 这是因为管的轴向刚度比弯曲刚度大得多, 应变曲线与无量纲位移曲线是一致的.

图 6 给出入射波波幅为 5cm 时应变随频率的变化曲线. 弯曲应变增长较快, 在 6.8 Hz 之后, 弯曲应变大于纵向应变.

(2). 埋深的影响. 图 7 中①曲线, 取 $f=1\text{Hz}$, $V_s=75\text{m/s}$, 其它参数同前; ②曲线, $f=7\text{Hz}$, $V_s=100\text{m/s}$, 其它参数同前. 浅埋时管线位移较小, 埋深大于 3m 以后位移变化不大.

(3). 剪切波速的影响. 图 8 是应变曲线, 图 9 是无量纲位移曲线, $f=5\text{Hz}$, 入射波幅值为 5cm. 图 8 表明相互作用影响随波速增大而减弱, 这是由于土的刚度提高和波长增大的结果. 图 8 中纵向应变在 $V_s=200\text{m/s}$ 时有一峰值, 可以推断在 $V_s < 100\text{m/s}$ 时弯曲应变也有一峰值. 因此, 在给定的管和地震波条件下, 存在一个应变极大值, 不能简单的认为软土中的管线更危险.

(4). 入射角 β 的影响. 图 10 中给出在不同频率、不同波类作用下, 管应变随 β 的变化曲线.

4. 甘文水、侯忠良^[6]应用经改进的 Wang L.R., L 方法, 对埋设管线在地震行波作用下的反应作了分析, 探讨了土弹簧刚度、管土之间的滑移、波速等因素对管线反应的影响, 并与现行简化方法作了对比, 指出现存的问题, 提出改进建议. 关于 Wang 方法, 作者

在单元位移插值函数中加入常应变项，使计算不出现不收敛的情况。

(1). 波速的影响 (图 11)

图中分别按考虑和不考虑管土之间滑移两种情况计算了波速对管道应变的影响。计算中取 $K_s = 2500 \text{ N/cm}^2$ ，土弹簧的最大弹性位移 $D_0 = 0.25 \text{ cm}$ 。波速对管道应变影响很大，在不考虑管土滑移时尤为显著。

(2). 与简化方法^{[7][8]}的比较。表 6 列出本文方法与简化方法计算结果对比，可见按简化方法计算值大于本文方法 2 倍多。两种方法的差别主要是地震波波形不同。算例中管截面积 $A = 480 \text{ cm}^2$ ，管材弹性模量 $E = 2.1 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$ ， $K_s = 2500 \text{ N/cm}^2$ ，波速 $C = 150 \text{ m/sec}$ ，地震位移幅值 $A_m = 8 \text{ cm}$ ，周期 $T = 0.8 \text{ sec}$ 。

该简化方法假定地震波为简谐波，其周期与场地自振周期相同，地震位移幅值按下式计算：

$$A_m = \frac{2TS k}{\pi} \quad (8)$$

场地上应变为：

$$\varepsilon_s = \frac{2\pi A_m}{L} \quad (9)$$

埋管的应变为：

$$\varepsilon_p = \alpha \varepsilon_s \quad (10)$$

输入四条地震记录，本文的计算结果与上述结果均列于表 6。由此可见，简化方法得出的结果是本文结果的两倍多。两种方法所用的数据除地震波波形外都是一样的，因此两种结果的差异可能来自于地震波波形的差异。

表—6. 本文结果与简化结果的比较

地震记录	$\bar{\varepsilon}$	$\bar{\varepsilon} / \bar{\varepsilon}_s$
Parkfield June 27, 1966 N40W 分量	0.715	2.77
Parkfield June 27, 1966 N50E 分量	0.914	2.17
El Centro May 18, 1940 S90W 分量	0.856	2.32
El Centro May 18, 1940 S00E 分量	0.829	8.29

考虑埋设管线在地震行波 $u_s(t - \frac{x}{c})$ 作用下的平衡方程：

$$AE \frac{d^2 u}{dx^2} - K_s u = -K_s u_s(t - \frac{x}{c}) \quad (11)$$

其中 u 为管道的轴向位移。令 $\lambda^2 = \frac{K_1}{EA}$ ，则方程(11)可写为：

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - \lambda^2 u = -\lambda^2 u_r(t - \frac{x}{c}) \quad (12)$$

对方程(12)作对于 t 的傅里叶变换 (以 F 表示)，令 $\bar{u} = F(u)$ ， $\bar{u}_r = F[u_r(t)]$ ，并注意到

$$F[u_r(t - \frac{x}{c})] = \exp(\frac{i\omega x}{c}) F[u_r(t)]$$

则式 (12) 变为

$$\frac{d^2 \bar{u}}{dx^2} - \lambda^2 \bar{u} = -\lambda^2 \exp(\frac{i\omega x}{c}) \bar{u}_r \quad (13)$$

其解为：

$$\bar{u}(\omega) = \frac{\bar{u}_r(\omega) \exp(\frac{i\omega x}{c})}{1 + (\frac{\omega}{\lambda c})^2} = \alpha \bar{u}_r(\omega) \exp(\frac{i\omega x}{c}) \quad (14)$$

式中

$$\alpha = [1 + (\frac{\omega}{\lambda c})^2]$$

应变谱

$$\begin{aligned} \bar{s}(\omega) &= F(\omega) = F(\frac{du}{dx}) = \frac{d\bar{u}}{dx} = \frac{i\alpha\omega \bar{u}_r \exp(\frac{i\omega x}{c})}{c} \\ |\bar{s}(\omega)| &= \frac{\alpha\omega |\bar{u}_r(\omega)|}{c} = \frac{\alpha |\bar{v}_r(\omega)|}{c} \end{aligned} \quad (15)$$

其中

$$\bar{v}_r(\omega) = F[v_r(t)]$$

为地震反应谱。

由式 (15) 可见，管道应变的卓越频率与地震加速度的卓越频率并不相同，而是与 $\alpha(\omega) |\bar{v}_r(\omega)|$ 的卓越频率相同。速度谱 $|\bar{v}_r(\omega)|$ 的卓越频率要比加速度谱的低（这可以从速度和加速度的时程曲线中看出），而 $\alpha(\omega) |\bar{v}_r(\omega)|$ 的卓越频率又比速度谱的低，因此，管

道应变谱 $|\varepsilon(\omega)|$ 的卓越频率要比加速度的低得多。

在文献[7]与[8]的简化计算公式中所用的地震波周期 T 是地震加速度波的卓越周期 (在计算中取为场地卓越周期), 这就是式 (10) 的计算结果偏大的原因所在。因此, 在利用式 (10) 时, 周期 T 应取 $\alpha(\omega)|v_g(\omega)|$ 的卓越周期, 或更简单一些, 取速度谱 $|v_g(\omega)|$ 的卓越周期, 而不是加速度的卓越周期。

在上述计算中, 若取 $T=3.8$ 秒, $A_m=8$ 厘米, 这按式 (10) 算得的应变是 0.84×10^{-5} , 与本文计算结果接近。另一方面, 从根据式 (8) 计算的位移幅值 A_m 上也可看出周期 T 取场地自振周期是不适宜的。假定 $T=0.8$ 秒 (对大多数场地来说这是太长了), $k_{bh}=0.15$ (相当于基岩加速度峰值为 $0.15g$), 则按式 (8) 计算的幅值只有 2.0 厘米左右, 大大小于相当烈度场地的地震位移幅值^[10]。在输入实际地震记录的拟静力分析中采用这样小的位移幅值显然是不适宜的。如果取 $T=3.8$ 秒, 则按式 (8) 计算的位移幅值是 9.3 厘米, 与统计数值差不多^[10]。

3. 土参数及滑移的影响

土参数包括土弹簧刚度 K_s 、土弹簧最大弹性位移 d_s 和土对单位管长的最大约束力 $t_s = K_s d_s$ 。根据文献[9], d_s 的取值, 对于砂土一般为 0.2 至 0.5 厘米, 粘土一般为 0.5 至 1.0 厘米。土弹簧刚度可按式

$$K_s = \pi \Delta_s D$$

计算。根据文献[11], Δ_s 可取 $0.6 \times 10^9 \text{ N/cm}^3$ 。

图 12 是在不同的 d_s 和 K_s 下管道应变随地震位移幅值 A_m 增长的情况。计算中管径取 140 厘米, K_g 取 2500 N/cm^2 。根据地震位移峰值的大小, 可把图 12 分为三个阶段。地震位移峰值 A_m 较小, 大部分管段的土弹簧保持线性状态, 管应变几乎与 A_m 呈线性增长。在这一阶段上参数对管应变的影响主要决定于 K_s , 与考虑滑移与否以及 d_s 几乎无关。当 A_m 继续增大, 反映进入第二阶段。在这一阶段较大一部分土弹簧进入屈服状态, 即管与土之间出现滑移, 考虑滑移的计算结果逐渐偏离线性结果。第三阶段, A_m 变得很大, 大部分管段出现滑移, 管应变随 A_m 的增长速度变慢, 非线性结果更大地偏离了线性结果。此时土参数对管应变的影响主要决定于 t_s 而与 K_s 和 d_s 几乎无关 (从图中可以看到, 当 $A_m=14$ 厘米时, 取 $K_s = 2500 \text{ N/cm}^2$, $d_s = 0.4$ 厘米的管应变与取 K_s

$= 4000 \text{ N/cm}^2$, $d_s = 0.25 \text{ cm}$ 时的管应变几乎相同, 而在这两种情况下 t_s 都等于 1000 N/cm^2)。

总的说来, 当 A_m 不太大时, 土参数对管应变的影响不大。这个结论与文献[7]和[8]的计算不相合。其原因, 如前所述, 是文献[7]和[8]中取的周期太短。图 13 所示是取 $K_s = \pi k_g D$, 弹性模量 $E = 2.1 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$, 管壁厚 $t = 1.0 \text{ cm}$, 波速 $c = 150 \text{ m/sec}$ 时在不同的周期 T 下, 应变传递系数 α 随 k_g 的变化情况。图中 $\alpha_{0.6}$ 是 $k_g = 0.6 \times 10^7$ 时 α 的值。从图可以看到, 当 T 较小时 α 随 k_g 变化很大; 而当 $T \geq 2.0$ 秒时, α 接近于 1.0 时, 随 k_g 变化很小。由于地震速度波卓越周期比较长, 这就是图 13 中管应变随土刚度变化不大的原因。根据这个结论, 在地震位移峰值不很大的条件下, 计算地震行波作用下埋管的反应时

可取 $\alpha = 1.0$ ，即管应变与土应变相等：

$$\varepsilon = \frac{V}{c} \frac{\pi \omega}{2}$$

这样就可以省去确定土弹簧参数和地震位移的工作，大大地简化了计算。

当地震位移很大，管段普遍出现滑移时，埋管的应力上限可由下式计算^[1]：

$$\sigma = \frac{t \cdot L}{A}$$

其中 L 为与位移波卓越周期对应的波长， A 为管的面积。

图 14 所示是在不同土参数条件下管端与土的相对位移随地震位移幅值 A_m 的变化情况。由图可以看出，滑移对管端与土的相对位移的影响比对管应变的影响要大得多。 d_m 越小，这种影响越大。因此在计算管端与土的相对位移时，必须考虑管与土的滑移。

5. 甘文水、侯忠良^[12]应用非线性有限元编制了对任意几何结构的三维连续或非连续埋设管线地震反应分析程序 (TERP)。该方法考虑了管土间的轴向滑动和接头变位的非线性，也考虑了扭转的非线性，并可直接输入地震记录。该程序计算速度快，计算一个管段约需 10 分钟。

应用该程序 TERP 对下列输油管线作了计算，并与简化法和日本新抗震设计法^[13]作了对比（表—7）： $\Phi 529$ ，壁厚 $t = 0.65\text{cm}$ ， $E = 2.1 \times 10^5 \text{MPa}$ ，剪切波速 $C_s = 250\text{m/s}$ ，场地土基本自振周期 $T = 0.65$ 秒，轴向弹簧刚度 $K_a = 10 \text{MPa}$ ，横向弹簧刚度 $K_b = 56 \text{MPa}$ ，8 度地震区。

表—7. TERP 方法与简化方法的比较

管型	$EV_m / 2Cs$	$\alpha EV_m / 2Cs$	文献[13]方法	TERP
直管应力 $\sigma(\text{MPa})$	78.96	56.54	80.9	39.84
90° 弯管头处应力(MPa)	—	—	—	67.91

6. 侯忠良、甘文水等^[14]针对管段的类型，提出管道抗震验算的三个准则。

(1). 强度验算。当管线受重力荷载（如重力、惯性力）为主时，其荷载不受管线的变形而变化，管线破坏（屈服或断裂）时将产生很大的位移。地上管线或河上跨越管线均属于此种情况。对于受力较复杂的地下管线中的三通、四通或弯管等，也可以按该准则验算。

(2). 延性验算。当管线受地震行波或断层作用时，其应变由土的相对位移引起，不会因管材屈服或接头松动而导致管线应变无限增大。此时只要保证管线有足够的延性或接头的变形能力即可。对于钢管，允许应变可取设计疲劳曲线中应变循环总次数为 40~50 次

应变值, A3 或 16Mn 钢管的应变允许值均可取 0.01。

(3). 曲屈验算。对于具有较高的初始压应力的钢管线(如加热输油), 在地震行波作用下最易发生壳型曲屈破坏。唐山地震, 秦京输油管线发生两例这种破坏(均在 7 度区)。当管线埋置较浅且地面位移较大时, 也可能发生梁型破坏, 即管线整体弯出地面, 但此时管中应力很快得到释放, 一般不会导致破坏。

7. 甘文水、侯忠良^[15]针对加热输油管线初始轴向压力很大的特点, 应用非线性有限元法作了上浮反应的分析。该方法考虑了初始轴向压应力、土的非线性以及浮力在管道浮出地面后随位移变化等因素。还探讨了轴向压应力值、液化域长度和管线埋深等因素对管线反应的影响。上述分析取管径 $\Phi 720\text{mm}$, 壁厚 $t=7\text{mm}$, 管内介质重力密度 $\gamma_0 = 8.76\text{kN/m}^3$, 液化土重力密度 $\gamma_s = 20.00\text{kN/m}^3$, 管顶埋深 $H=0.64\text{m}$, 取轴向压力 $N=0$ 和 $N=3360\text{kN}$ 两种情况。

参考文献

- [1]. 叶耀先、魏琰等, 浅埋地下管线的动力性能, 地震工程论文集, 科学出版社, 1982.
- [2]. 中华人民共和国国家标准, 室外给水排水和煤气热力工程抗震设计规范 (TJ32-78), 1979.
- [3]. 熊占路, 用离散模型分析地下管道的地震应力, 第二届全国地震工程会议论文集, 1987.
- [4]. 谢旭、何玉敖, 地下埋设管线通过不同介质时的地震反应研究, 第二届全国地震工程会议论文集, 1987.
- [5]. 王海波、林皋, 半无限弹性介质中管线地震反应分析, 土木工程学报, 第 20 卷第 3 期, 1987.
- [6]. 甘文水、侯忠良, 地震行波作用下埋设管线的反应计算, 地震工程与工程振动, Vol.8, No.2, 1988.
- [7]. Toki, K., Fukumori, Soko, M., and Tsubakimoto, T., Recommended for Earthquake Resistant Design of High Pressure Gas Pipelines, Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment, PVP-77, ASME.
- [8]. Criteria of Earthquake-Proof Measures for a Water Supply System, Japan Water Works Association, 1979.
- [9]. Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipelines System, Committee on Gas and Liquid Fuel Lifeline of ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, 1984.
- [10]. I. M. Idriss, 地震动特性, 谢礼力译, 地震工程和土动力问题论文集, 地震出版社, 1982.
- [11]. ガス导管设计指南, 日本ガス协会, 1982.
- [12]. 甘文水、侯忠良, 地震行波作用下三维埋设管线反应分析, 工业建筑, No.1, 1991.