

海底管线地震应力分析方法和建议

孙政策¹, 段梦兰², 刘立名³, 张文¹, 陈德诚⁴

(1. 复旦大学力学系, 上海 200433; 2. 中国船级社海洋工程部, 北京 100006;
3. 中国海洋石油总公司研究中心, 北京 100027; 4. 北京大学力学系, 北京 100871)

[摘要] 比较全面地分析并概述了海底管线抗震设计所面临的问题; 结合工程应用, 给出了解决这些问题的基本思路和建议, 希望能够对海底管线抗震设计方法研究和抗震规范的制定提供一定的帮助。

[关键词] 海底管线; 地震波; 断裂带; 应力应变; 悬跨; 弯管

[中图分类号] P315.3; P315.9; TE973.92 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)08-0076-05

1 引言

管线(地上、地面和地下)已在输油、输气、输水以及通讯、供电、交通和排水等方面得到广泛应用, 成为现代化和城镇生活的大动脉, 因而被人们称为生命线工程^[1]。

近年来, 随着海洋石油和天然气的开发, 海底管线在世界范围内得到了广泛应用, 成为海上油气田开发工程中的一个重要环节。按照我国油气工业的发展趋势, 海上油气田在今后一段时期内将成为稳定我国原油产量的主导力量, 同时也预示着我国海底管线的铺设量将有较大幅度的增加。

海底管线造价昂贵、维修复杂、维修费用高, 容易造成环境污染, 因此, 其安全问题受到国内外的广泛关注。如何确保这些生命线在运行中安全可靠, 是工程设计和管理部门面临的关键问题。

地震的破坏性巨大, 我国处于世界两大地震带(环太平洋带和中亚-地中海带)之间^[2], 是一个多地震国家。地震的基本特点是: 震源浅、烈度高、分布广^[3,4], 尤其是有着丰富石油资源的渤海湾地区属于地震高发区^[5], 铺设海底管线必须考虑地震的影响。因此, 海底管线的地震应力计算是

管线工程设计人员的重要课题之一。

由于海底管线技术复杂、投资高、风险大, 国内在该领域的研究和实践起步较晚, 做的工作较少, 仅有少量的局部性的成果^[6], 还缺乏系统的、全面的、可实际应用于抗震设计的研究成果。目前, 国内工程设计人员在进进行海底管线抗震设计时, 还没有自己的规范^[7]。中国船级社^[8]和挪威船级社都没有给出具体可参照的管线抗震设计方法, 仅在考虑环境载荷部分提到: 在地震带铺设管线要考虑地震载荷的影响。因此, 设计人员在进进行海底管线的抗震设计时, 考虑到地震的影响, 所参照的设计规范^[9]基本上与日本的陆地管线抗震设计规范相同。

国际上对海底管线的研究已有很长的历史。近年来, 每年一次的海洋技术会议(OTC)、海洋力学和极地工程会议(OMAE)、深海技术会议(DOT)都设有管线讨论专题。其中对海底管线抗震有推动的研究工作主要集中于管土之间相互作用的试验分析^[10-13], 以及悬跨管线动态特征的试验和理论分析^[14-16], 并取得了许多有重要参考价值的成果。但由于研究的针对性不同且缺乏系统性, 无法形成工程上可以实际应用的海底管线抗震设计

[收稿日期] 2003-01-31; **修回日期** 2003-05-20

[基金项目] 上海市博士后科研项目(2126002), 中国海洋石油总公司“十五”重大基础科研项目(CNOOCRC-DEI-2002-003)

[作者简介] 孙政策(1971-), 男, 陕西咸阳市人, 复旦大学博士

规范。

多次的设计及应用实践表明,依照陆地管线抗震规范进行的设计偏于保守,造成管线投资的浪费。所以,加强我国在海底管线地震响应与抗震设计方面的系统、全面的研究,掌握海底管线地震响应特征,给出制定我国抗震规范的理论基础,已迫在眉睫。

笔者根据国内外的管线抗震设计现状,结合管线地震应力研究趋势以及海洋环境的实际情况和工程设计中面临的问题,为制定我国海底管线抗震规范,从工程应用出发,总结了这方面研究工作的现状及存在的问题,并提出了解决方法。

2 海底管线地震波应力分析

在工程上,地震对管线的影响一般分为地震波影响和地震断裂带影响。地震波对海底管线的影响可按两种方式进行分析。

2.1 地震波对海底埋设管线影响的分析

多次地震表明,地下埋设管线破坏与否,不取决于管线上的惯性力,而取决于管线及周围土壤的变位大小^[1]。这是地上结构物与地下管线抗震设计的主要区别。

在以往观测地震运动的基础上,得知地基与管道的运动非常相近,且沿管道轴向地震动力与横向地震动力属同一量级。测试结果表明,管道中的轴向应变比弯曲应变大得多。因此,轴向变形在震害现象分析中受到重视。

由地震波引发的地下管道动力分析问题,最早是假定管道与周围土体一起运动,周围土体的应变即为管道的应变。但由于管线材料的弹性模量远大于土壤的弹性模量,管线地震变位与土壤变位一致的假定显然比较保守且与实际情况不符。因此,考虑管线与土壤有相对变位的地震应力分析是现今最普遍的方法,其应力分析数学模型为^[1]

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} u_t(x, t) + \lambda_p^2 (u(x, t) - u_t(x, t)) = 0, \quad (1)$$

式中 $u_t(x, t)$ 为管道沿纵轴的位移, $u(x, t)$ 为土体沿管轴的位移, λ_p 是管道与土体之间的约束程度系数。

这个地震应力分析方法成立的前提是土壤变位处于弹性范围内,意味着单位长度上土壤作用于管线的地震作用力必须小于管土之间的极限约束力,

这个极限约束力的大小决定于土壤的剪切强度和管线的外径等因素。对于陆地管线来说,一般埋设比较深,土壤的剪切强度比较大,所以极限约束力比较大,应用此法进行地震应力分析时,基本保证了土壤变位处于弹性范围内。但是,海底管线一般埋设比较浅,土壤的剪切强度比较低,因而土壤对管线的极限约束力相对要小得多。

笔者应用工程实际勘探参数进行的初步分析发现,进行海底管线抗震设计时,如果完全采用陆地管线的做法,得到的地震应力往往接近或大于极限作用应力。这说明目前应用的地震应力计算方法对海底管线不大适用。另外,考虑管土相对位移的地震应力计算方法,由于其前提是保证在地震时管土之间约束在弹性范围内,管线的地震应力值几乎正比于地震时的土壤变位幅值,而与管线的管径和壁厚关系很小,这一特点使得工程人员在管线应力校核时,如果忽略了管土之间约束是否在弹性范围,一旦遇到地震应力过大,往往感到无从下手,因为无论是改变管径还是管壁厚,都在减小地震应力方面收效甚微。这也是工程人员在应用陆地管线抗震规范进行海底管线抗震设计时所面临的问题,因为该规范没有提供在设计地震烈度下,判断管土之间约束是否在弹性范围内的条件。

根据以上分析,笔者建议,在陆地管线分析的基础上,结合海洋环境的具体特点和海底参数测试能力,给出海底管线的极限地震应力计算方法,作为地震应力计算的第一步。如果符合管线强度要求,可以结束校核;如需更详细的分析,可根据第一步得到的土壤弹性最大变位作为参照,当设计地震变位大于此值,地震应力直接取极限应力,若小于此值,可根据相对变位地震应力计算公式详细计算。极限应力方法的另一特点,是地震应力值与管线截面积成反比。设计人员如果以极限应力作为强度校核取用参数,当大于容许应力时,可以考虑加大壁厚来降低地震应力,但加大壁厚必须满足管线的其他要求。

1975年帕米利和勒德基^[4]提出用半弹性地基梁理论分析地下管道的土管相互作用,假设在半无限弹性地基表面下某一深处有一地下管道,管土共同体系的动力反应可以用管道处的一个水平集中力产生的静力位移来代替,体系的运动方程为

$$M \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(t) + C_s \frac{\partial}{\partial t} u(t) + Ku(t) = -M \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_g(t), \quad (2)$$

式中 K 为管道中单位相对位移的弹性抗力系数; $M = M_p + M_s$, M_p 为管道质量, M_s 为土壤的有效质量; C_s 为土壤与管道相互作用的阻尼系数, u 为管道相对于周围土壤的位移, u_g 为地震动使管道产生的位移。

在工程应用中,由于弹性抗力系数难以确定且管线跨越区域很大,这种方法在大跨越管线地震应力计算方面的应用尚不多见。

2.2 海底裸露管线的地震应力计算

在确定海底管线铺设方案时,若处于渔业作业很少和较深的海域,经常直接把管线裸露铺设在海床上。对于这种管线,目前还没有相应的地震应力计算方法,国内外普遍的做法是不进行地震应力校核。但实际上,工程设计人员还是希望能够给予这种铺设形式的地震应力一个量的标准,以便在管线更详细的设计时有理论依据。

根据实际经验和计算的简化要求,笔者认为可以做两种假设:一种是海底土壤较密实,承载力较大,平敷海管未发生沉降;另一种是海底表面较松软,海管由于自然沉降,加上海洋生物和海流的作用有自埋趋势^[17],乃至被土壤浅埋。从安全设计的观点出发,可假设海管被浅埋,这种方法更为工程人员接受。

2.2.1 在海底面平放未覆盖与海床理想接触的海底管线,其真空中模型首先可以简化为具有若干个弹性支座的等截面梁。但是,当弹性支座较多时,求解频率方程比较麻烦,在这种情况下可将其进一步简化为符合文克尔(Winkler)假定的弹性地基梁^[18],如图1所示。

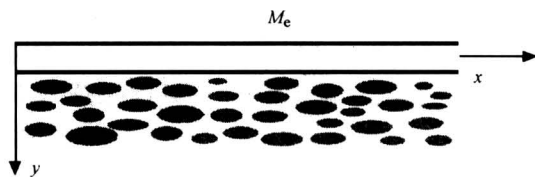


图1 文克尔弹性地基梁

Fig.1 Winkler elastic ground sill beam

以此假设建立的弹性地基梁自由振动微分方程为

$$E_J \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + C_e y = - M_e \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \quad (3)$$

式中 E_J 为梁的抗弯刚度, C_e 为地基弹性系数, M_e 为梁的平均质量。

在液体介质中振动的弹性结构动力特性和在真

空中所得到的结构动力特性有很大差别。但在近似计算中经常遇到的最普遍的假设是认为结构在液体中的振型与在真空中的相同。这种假设的优点是,可以把液体弹性问题分解为一系列比较简单的问题,以适合于工程应用。解这个问题的步骤首先是确定在真空中的振型,然后计算附加质量,通过第一个问题的解得到结构的振型,最后考虑附加质量求结构的自振频率,对照地震谱得到应力。

2.2.2 沉降浅埋 这种情况相对于前面埋设管线的地震应力计算,只是土壤的约束条件发生了变化。比较保守地估计管线地震应力,计算出极限应力就可以了,这个结果基本上可以满足工程设计要求,而且比较容易实现。

3 地震断裂带对海底管线影响分析

现代海底输油管线基本上是由塑性较好的钢材制造,管段由对接焊缝连接,且相比陆地管线埋设一般较浅,因此,地震波对海底管线造成破坏较少^[19]。从已有的破坏实例知,地下管道的损坏主要是由地震断裂带运动造成的,如在1976年唐山地震中,秦皇岛至北京输油管道有四处破损均发生在与断层相交的位置^[20]。

地震断裂带对海底管线的影响也可按埋设与未埋设两种形式来分析。实际上裸露管线经常都被浅埋,这时得到的应力通常虽有些保守,但比较符合工程上的要求。所以,可以将其作为埋设管线来分析,只是管土之间的约束要小。这样,对地震断裂带的应力计算就可以简化为“埋设”一种形式了。

目前,最常用的断裂带上管线应力应变计算方法是:首先根据管土摩擦阻力求出断裂带两端管线的锚固距离,如图2中 L_1 和 L_2 的长度,然后应用Newmark提出的考虑管线承受大位移的非线性变形分析方法^[21],得到锚固段的平均应力应变。

对于海底管线而言,在此法的基础上,考虑到海底管线周围土壤环境的参数和管线应力应变的不均匀性,建立地震断裂带上管线应力应变的计算方法是切实可行的。相对于陆地管线,这里最重要的参数是考虑管土浮容重的管线单位长度摩擦力。

4 海底管线悬跨地震响应特性分析

直接铺设在海床上的管线,由于床面形状不规则,出现悬跨是不可避免的。海流的长期冲刷、淘蚀也可能使管道下面形成空洞,再加上不断通过的

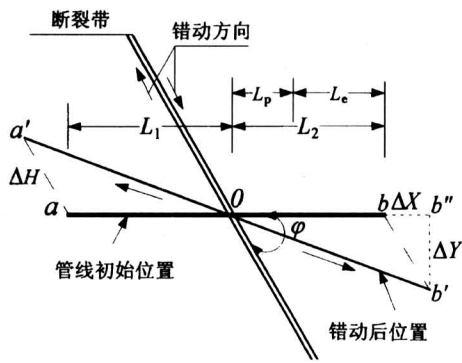


图 2 断裂带上的埋地管线

Fig.2 Buried pipelines subjected to fault movements

流作用,这个悬跨距离就可能加长,形成长 L 、悬空高 h 的悬跨段,如图 3 所示。地震时,悬跨段就会出现地震响应特征。从海洋作业的现实情况看,详细勘察海底管线铺设路线上的实际悬跨长度是相当复杂和难以实现的。笔者认为比较合理的解决办法是:根据海底管线的常规考虑载荷、设定的抗震级别及管线允许应力,计算出地震时保证管线安全的最大悬跨,再根据已有工程的调查结果和设计经验估算新工程的最大悬跨,二者进行比较,当后者较小时,可以不计算悬跨的影响;如果二者比较接近,可根据具体的悬跨长度计算应力值,或建议采取其他方式减小悬跨距离。

从工程应用考虑,在具体计算时,可先假定悬跨管线为简支梁结构,确定其边界条件,与前述理想平铺管线的方法相似,首先确定悬跨管线在真空中的振型,其次计算附加水的附加质量,最后考虑附加质量求出结构的自振频率,对照地震谱得到管线悬跨处的最大应力。

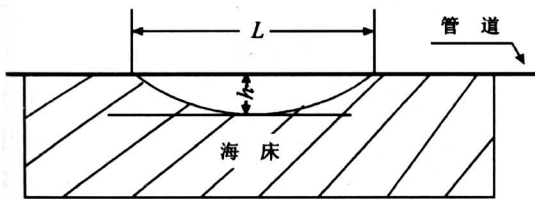


图 3 海底悬跨管线

Fig.3 Spanning submarine pipelines

5 地震中海底管线的危险结构形式

根据陆地管线震害经验,管接头、管道出土处等特殊结构的事故率最高。对于海底管线来说,一些特殊结构的地震应力分析对预防管道震害很重要,

其中弯管段就是最重要的一种结构。这里“弯管”的定义是:海底管线与平台上立管的连接部(如图 4 所示)。海底管线从埋地中伸出,通过弯管与立管连接^[22]。作为连接处,具有埋地土壤的固结作用,地震时将引发复杂的应力。目前,国内外在这方面的研究相对来说更少,笔者希望引起国内管线专家的重视。

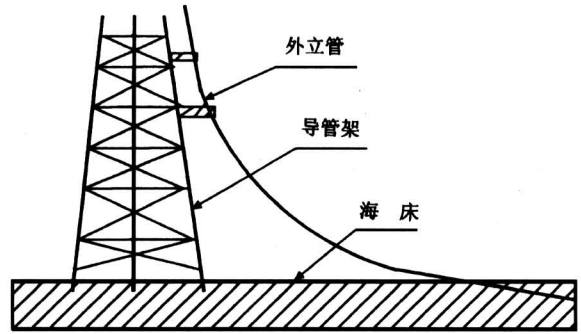


图 4 弯管

Fig.4 Siphon

6 结语

根据国内外管线抗震研究现状、工程实际和笔者的初步分析,将海底管线抗震设计方法研究初步分为地震波影响、断裂带影响、悬跨段和弯管段四个方面;结合海洋环境给出前三个方面的研究建议,尤其是地震波应力分析和断裂带应力分析对海底管线抗震设计具有指导意义。关于埋设海底管线的极限地震应力设计方法的论文将在近期发表。

参考文献

- [1] 格赫曼 A C, 扎伊涅特季诺夫 X X. 管道的抗震设计施工与监护[M]. 北京:地震出版社, 1992
- [2] Zhuang Yizhou, Jin Weiliang. Aseismic reliability analysis approach for offshore jacket platform structures [J]. China Ocean Engineering, 1998, 12 (4):375~382
- [3] 张德元, 刘元生, 李一兵. 油田地震信息监测研究与应用[M]. 北京:地震出版社, 1995
- [4] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社, 1988
- [5] 魏光兴, 刁守中, 周翠英. 郯庐带地震活动性研究[M]. 北京:地震出版社, 1993
- [6] 周晶, 李昕, 马冬霞. 海底悬跨管线的地震响应和振动控制[J]. 世界地震工程, 2000, 16(4): 58~62
- [7] 王金英, 赵冬岩. 渤海海底管线工程的现状和问题[J]. 中国海上油田(工程), 1992, 4(1): 1~6

- [8] 中国船级社. 海底管线系统规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1992
- [9] 渤海工程设计公司. 海底管线系统(结构部分)设计指南(ST-103)[S]. 天津: 渤海工程设计公司, 1987
- [10] Paulin M L, Phillips R, Boivin R, et al. Establishment of a full-scale pipeline/soil interaction test facility and results from lateral and axial investigations in sand [A]. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference [C]. 1997. 139~146
- [11] Verley R L P, Sotberg T. A soil resistance model for pipeline placed on sandy soils [A]. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference [C]. 1992. 123~131
- [12] Verley R L P, Lund K M. A soil resistance model for pipeline placed on clay soils [A]. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference [C]. 1995. 225~232
- [13] Brennodden H, Lieng J T, Sotberg T, et al. An energy-based pipe-soil interaction model [A]. Offshore Technology Conference [C]. 1989. 147~158
- [14] Orgill G, Barbas S T, Crossley C W. Current practice in determining allowable pipeline free spans [A]. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference [C]. 1992. 139~145
- [15] Tura F, Dumitrescu A, Bryndum M B, et al. Guidelines for free spanning pipelines: the gudesp project [A]. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference [C]. 1994. 247~256
- [16] Bruschi R, Curti G, Marchesani F, et al. The maspus project: upgrades for deep water pipelines on very uneven seabeds [A]. Deep Offshore Technology Conference [C]. 1993. 98~140
- [17] Pu Qun, Li Kun, Gao Fuping. Scour of the seabed under a pipeline in oscillating flow [J]. China Ocean Engineering, 2001, 15(1): 129~137
- [18] 李桂清, 抗震机构计算理论和方法[M]. 北京: 地震出版社, 1985
- [19] 中国石油天然气总公司抗震办公室. 输油(气)埋地钢质管道抗震设计规范(SY/T0450-97)[S]. 北京: 石油工业出版社, 1998
- [20] 侯忠良, 王优龙, 姚伯英, 等. 地下管线抗震[M]. 北京: 学术书刊出版社, 1990
- [21] Newmark N W, Hall W J. Pipeline design to resist large fault displacements [A]. Proc U S National Conference on Earthquake Engineering [C]. Ann Arbor, Mich, 1957. 416~425
- [22] 马良. 海底油气管道工程[M]. 北京: 海洋出版社, 1987

The Analyzing Methods and Advice on Seismic Stress Calculation of Offshore Pipelines

Sun Zhengce¹, Duan Menglan², Liu Liming³, Zhang Wen¹, Chen Decheng⁴

(1. Dept. of Mechanics, Fudan University, Shanghai 200433, China;

2. Dept. of Offshore Engineering, China Classification Society, Beijing 100006, China;

3. Research Center, CNOOC, Beijing 100027, China;

4. Dept. of Mechanics, Peking University, Beijing 100871, China)

[Abstract] The paper comprehensively analyzes and summarizes main problems that exist in seismic stress calculation of offshore pipelines. In combination with demands of engineering design, some thoughts and advice are given to deal with the problems, which are expected to benefit researches on anti-seismic design method, in addition to establishment of anti-seismic criterion of offshore pipelines.

[Key words] offshore pipeline; seismic wave; fault; stress-strain; span; syphon