

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0343-04

腐蚀海底管线悬跨段的地震响应分析

孙 丽¹, 张新收², 张美真¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁, 沈阳 110168; 2. 济南中建建筑设计院, 山东, 济南 250101)

摘 要: 由于海底管线会因为各种各样的原因出现悬跨段, 悬跨段的受力较为复杂, 包括海流和波浪的水动力、管线内压、温度以及地震荷载和其他一些突发荷载等, 所以需要加强对管线悬跨管段的动力响应研究。另外现役的海底管线有很多已达到了其设计正常使用年限, 出现了不同程度的问题, 而腐蚀是导致管线损坏的主要原因。目前对完好管线悬跨段的研究已进行了很长一段时间, 而关于腐蚀管线悬跨段的研究还较少, 针对这种情况, 该文对完好海底管线悬跨段进行了试验和有限元分析, 分析表明: 试验和模拟得到的基频和加速度放大系数沿轴线的变化趋势一致, ABAQUS 能够准确地模拟悬跨管线的地震响应问题。同时, 对腐蚀管线悬跨段的固有频率、加速度放大系数和最大加速度沿轴线的变化规律进行了有限元分析。研究表明: 腐蚀位置、腐蚀厚度、腐蚀长度和腐蚀宽度对上述方面都会产生不同的影响, 且腐蚀宽度的变化对管线动力响应影响最大。

关键词: 海底管线; 地震响应; 有限元; 腐蚀损伤; 悬跨段

中图分类号: TE832 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.06.S027

THE SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF CORROSIVE SUBMARINE PIPELINE SUSPENDED SPAN SEGMENT

SUN Li¹, ZHANG Xin-shou², ZHANG Mei-zhen¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China;

2. CSCEC Jinan Architectural Design Institute Co. Ltd, Jinan, Shandong 250101, China)

Abstract: A submarine pipeline would appear suspended span segments because its complex stress states such as the action of water currents and waves, pipeline pressure, temperature, seismic loading and other sudden loads. This is why its dynamic response analysis should be strengthened. At the same time, there are many submarine pipelines, which are working right now, and they had reached their design working lives. This kind of submarine pipeline might have many problems. The main reason leading to pipeline damage is the corrosion. At present, the researches about the intact pipeline suspended span segments have been studied for a long time, while there is little analysis for corroded pipeline suspended span segments. According to the research status, the experiment and finite element analysis of intact submarine pipeline suspended span segment are performed. The analyses show that the variation trends of the fundamental frequency and acceleration amplification coefficient along the axis obtained from experiment and simulation are coincident, and the seismic response of the pipeline suspended span can be simulated accurately by ABAQUS. Meanwhile, the change rules of natural frequency, the acceleration amplification coefficient, and the maximum acceleration along the axis of corroded pipeline suspended span segments are analyzed, based on the finite element software. Our studies show that the factors which can affect above aspects such as the change rules of natural frequency, the corrosion position, corrosion thickness, corrosion length and corrosion width, and that the influence of corrosion width on pipeline seismic response is the biggest.

Key words: submarine pipeline; seismic response; finite element; corrosion damage; suspended span segment

收稿日期: 2012-06-23; 修改日期: 2012-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(10902073); 住房和城乡建设部科技攻关计划项目(2010-k3-57)

通讯作者: 孙 丽(1974—), 女, 辽宁人, 教授, 博士, 主要从事结构健康监测、混凝土结构基本理论研究(E-mail: sunli2001@hotmail.com).

作者简介: 张新收(1987—), 男, 吉林人, 助工, 硕士, 主要从事结构设计研究(E-mail: shou85827@163.com);

张美真(1988—), 女, 河北人, 硕士生, 主要从事 FRP 钢筋混凝土结构理论研究(E-mail: wo_shimeizhen@126.com).

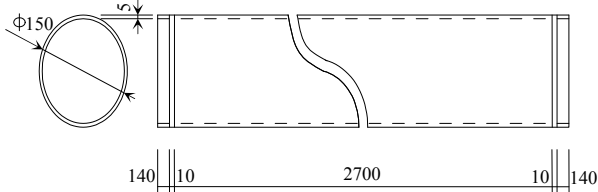
1 完好管线悬跨段分析

1.1 试验方案

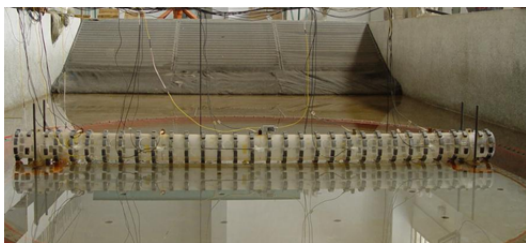
试验原型钢管尺寸为：外径 $D_0=720\text{mm}$ ，壁厚 $t_0=15\text{mm}$ ，密度 $\rho_0=7.8\times 10^3\text{kg/m}^3$ ，弹性模量 $E_0=2.10\times 10^5\text{MPa}$ ，泊松比 $\mu_0=0.3$ 。

试验采用有机玻璃管，根据相似原理(弹性力相似、刚度相似、液体-固体相似)，设计的管线的试验模型尺寸为：外径 $D_1=150\text{mm}$ ，壁厚 $t_1=5\text{mm}$ ，密度 $\rho_1=1.2\times 10^3\text{kg/m}^3$ ，弹性模量 $E_1=3450\text{MPa}$ ，泊松比 $\mu_1=0.34$ ，总长度 $L_0=3\text{m}$ ，悬跨长度 $L_1=2.7\text{m}$ ，如图 1 所示，图中 10mm 宽度处为设置的管线的简支支撑。另外为了保证试验模型与钢管原型的单位质量相同，使用铅块对试验模型管线施加了 $1.5\text{kg}/0.1\text{m}$ 的配重。

在试验中，对管线分别输入正弦波和 EL-Centro 波，并且为水平方向的加载。管线的悬跨高度为 10cm，管线为空管。



(a) 模型简图



(b) 管线模型



(c) 管线支座

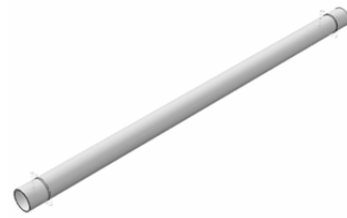
图 1 海底管线在水下振动台上的模型

Fig.1 The model of submarine pipeline on underwater shaking table

1.2 模拟方案

有限元模型尺寸与试验模型相同。试验中为了保证试验模型与钢管原型的单位质量相同，在模拟

中材料密度取 $\rho_0=7.8\times 10^3\text{kg/m}^3$ ，其他材料属性与试验相同。在建立有限元模型时分别使用了壳单元和实体单元，管线的边界条件按照试验定义为简支支撑。管线有限元模型见图 2。



(a) 有限元模型

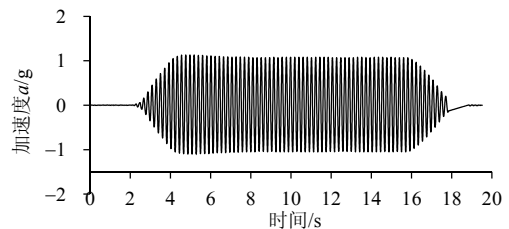


(b) 网格划分图

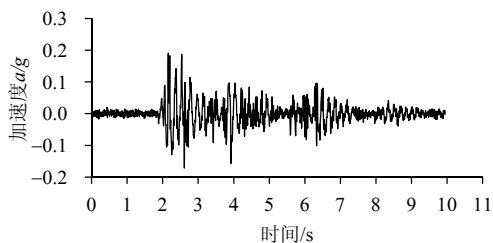
图 2 管线有限元模型图

Fig.2 Finite element model diagram of pipeline

管线的模拟计算工况与试验工况相同，分别计算了管线在正弦波和 EL-Centro 波的水平的动力响应。参考 GB 50011-2010《建筑抗震设计规范》^[10] 第 5.1.2 条文的规定，所选取的正弦波和 EL-Centro 波的波形如图 3 所示。



(a) 正弦波波形



(b) EL-Centro 波波形

图 3 有限元输入动荷载波形

Fig.3 The dynamic load waveform graph of finite element input

1.3 结果分析

试验得到的悬跨管线的基频为 7.67Hz，实体单元模拟为 7.5674Hz，壳单元模拟为 7.7285Hz，模拟

误差均较小。图 4 为各测点的加速度放大系数沿管线轴向的变化。其中： x 代表腐蚀位置距管端距离； L 代表管线总长； a_{max} 代表腐蚀位置加速度； a_0 代表支座处加速度。从图中可以看出，整体上试验与模拟的变化趋势一致，各测点的加速度放大系数误差较小，因此 ABAQUS 能够准确的模拟管线的动力响应问题。

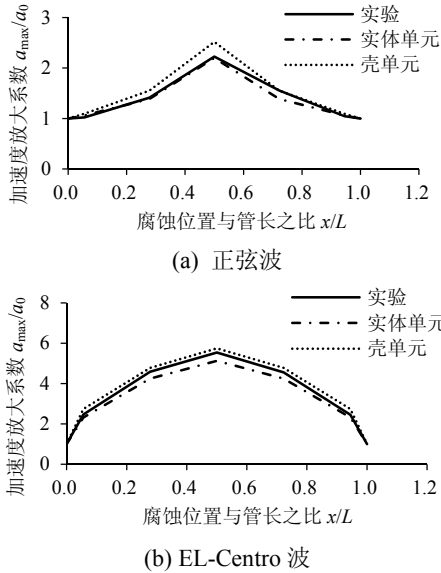


图 4 水平地震动输入下 a_{max}/a_0-x 变化图
Fig.4 Under seismic input level change map a_{max}/a_0-x

2 腐蚀管线悬跨段分析

2.1 有限元模型建立

腐蚀管线模型的材料属性和管线几何尺寸与 1.2 节有限元模型相同。模型采用实体单元，假设管线为内腐蚀，输入与 1.2 节相同的正弦波和

EL-Centro 波，波形见图 3。图 5 为腐蚀管线的有限元模型。

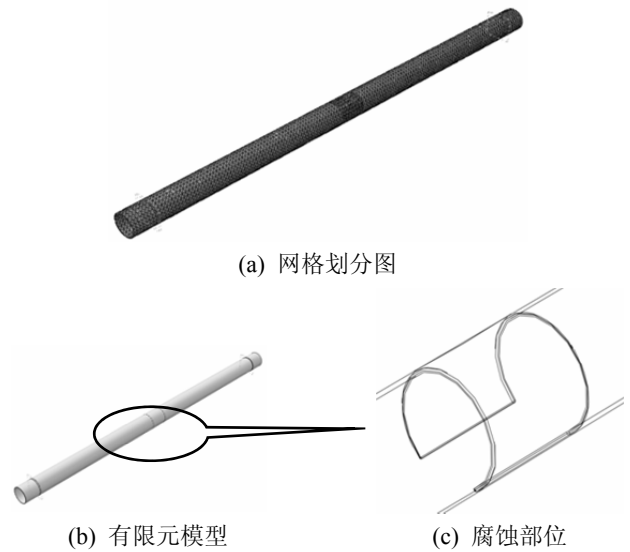


图 5 腐蚀管线有限元模型图

Fig.5 Finite element model of corroded pipeline

2.2 计算工况

对同一腐蚀尺寸不同腐蚀位置和同一腐蚀位置不同腐蚀尺寸的腐蚀管线进行了有限元分析，并且考虑了加载方向的影响。腐蚀位置为腐蚀中心与支座的距离，具体计算工况见表 1。

2.3 结果分析

1) 腐蚀位置的影响。

腐蚀管线的固有频率均大于完好管线，且其值随着腐蚀位置逐渐靠近跨中而增大，当腐蚀位置发生在悬跨段跨中时最大，整个变化过程近似于线性，如图 6 所示。

表 1 腐蚀管线有限元计算工况

Table 1 Finite element calculation of pipeline corrosion conditions

腐蚀工况	管线编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
腐蚀位置/mm	150	350	550	750	950	1150	1350	1350	1350	1350
腐蚀厚度 d/t	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.8	0.8	0.8
腐蚀长度 L/\sqrt{Dt}	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	5.69	5.69
半腐蚀宽度 θ/π	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.8

图 7 为腐蚀位置从支座端向跨中逐渐变化时，相应的加速度放大系数沿管线轴向的变化曲线。整体上，所有曲线均呈现先增大后减小的变化规律，且不同腐蚀位置时，支座附近管线的加速度放大系数变化不大， $0.15L_1 \sim 0.75L_1$ 间管线的地震响应变化较为明显，最大加速度均出现在管线跨中。在跨中位置，加速度放大系数随着腐蚀位置向跨中的移动呈现先增大后减小的变化规律，当腐蚀位置在

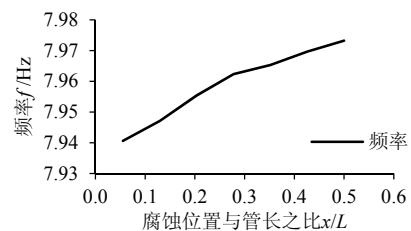


图 6 腐蚀管线固有频率随腐蚀位置的变化

Fig.6 The natural frequency changes of corrosion pipeline by the corrosion location

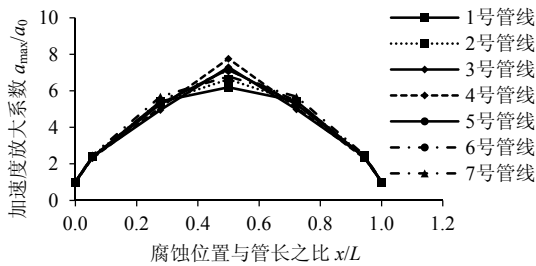


图7 不同腐蚀位置管线的 a_{max}/a_0-x 变化图

Fig.7 a_{max}/a_0-x change map for different corrosion location of pipelines

0.3L₁左右时(4号管线),跨中的地震响应达到最大。

2) 腐蚀尺寸的影响。

7号管线、8号管线、9号管线和10号管线的固有频率依次为7.9732Hz、8.0024Hz、8.0504Hz和8.0613Hz,随着腐蚀深度、腐蚀长度和腐蚀宽度的增加,管线的固有频率也逐渐变大。

a) 腐蚀厚度

从图8可以看出,腐蚀厚度小的管线在跨中附近的加速度放大系数偏大,其他位置差别较小,整体上,加速度放大系数沿管线轴向的变化规律一致。说明腐蚀厚度对管线的地震响应有一定的影响。

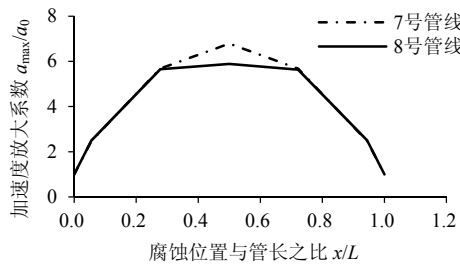


图8 不同腐蚀厚度管线的 a_{max}/a_0-x 变化图

Fig.8 a_{max}/a_0-x change map for different corrosion thickness of pipelines

b) 腐蚀长度

各测点上,9号管线的加速度放大系数均比8号管线大,但与8号管线不同的是,9号管线在跨中的加速度放大系数比相邻两个数据采集点的小,即9号管线轴向的最大加速度出现在0.3L₁和0.7L₁左右的位置处,说明腐蚀长度对管线的地震响应有较大影响。如图9所示。

c) 腐蚀宽度

从图10可以看出,支座附近管线的地震响应变化很小,但中间段管线的地震响应有明显的变化,除了在跨中附近10号管线的加速度放大系数比9号管线略大外,其他位置10号管线均较小,并且两条管线的变化规律也有明显的区别,说明腐蚀宽度对管线地震响应的影响较明显。

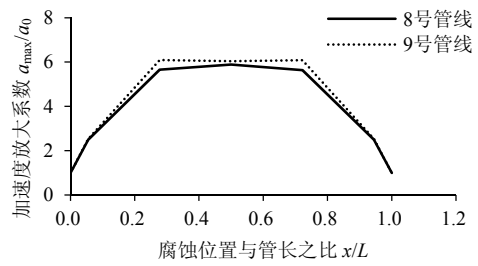


图9 不同腐蚀长度管线的 a_{max}/a_0-x 变化图

Fig.9 a_{max}/a_0-x change map for different corrosion length of pipelines

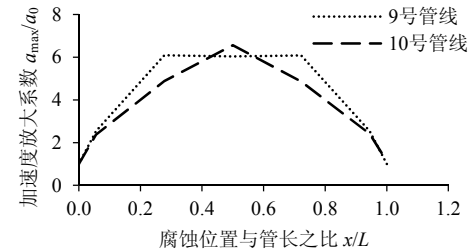


图10 不同腐蚀宽度管线的 a_{max}/a_0-x 变化图

Fig.10 a_{max}/a_0-x change map for different corrosion width of pipelines

3 结论

本文通过计算和分析,得出以下结论:

(1) 通过对实验结果和有限元模拟结果的对比,发现 ABAQUS 能够准确地模拟悬跨管线的地震响应问题,且模拟结果相对较小。

(2) 对于相同腐蚀尺寸的悬跨管线,悬跨位置越接近跨中,管线固有频率越大。另外,不同腐蚀尺寸时,腐蚀厚度越大、腐蚀长度越大、腐蚀宽度越大,管线的固有频率越大。

(3) 对相同腐蚀尺寸的管线,当腐蚀位置在0.3L₁左右时,跨中加速度放大系数达到最大值,即此时管线的动力响应最大。对于不同腐蚀尺寸时,腐蚀厚度、腐蚀长度和腐蚀宽度对管线的地震响应沿轴线的变化规律会产生不同的影响,且腐蚀宽度的变化对管线动力响应产生的影响作用最大。

参考文献:

[1] MMS. Proceeding of the international workshop on the damage to underwater pipelines [R]. New Orleans U.S.A: Minerals Management Service, 1995.
 [2] 夏兰廷, 黄桂桥, 张三平, 等. 金属材料的海洋腐蚀与防护[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 25-40.
 Xia Lanting, Huang Guiqiao, Zhang Sanping, et al. Marine corrosion and protection of metal materials [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2003: 25-40. (in Chinese)

(参考文献[3]-[10]转第352页)

- 12(2): 48—51. (in Chinese)
- [6] 陈孙艺. 弯管在面内开弯矩作用下的弹性应力解析解[J]. 工程力学, 2010, 27(增刊 II): 163—166.
Chen Sunyi. Elastic stresses for pipe elbows subjected to in-plane open-bending moments [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(Suppl II): 163—166. (in Chinese)
- [7] 陈孙艺, 柳曾典, 陈进, 何录武. 异径弯管在面内闭弯矩作用下的弹性应力及极限闭弯矩解析解[C]//压力管道技术研究进展精选集. 北京: 化学工业出版社, 2010: 37—41.
Chen Sunyi, Liu Cengdian, Chen Jin, He Luwu. Elastic stresses and limit close-bending moments of reducing bends subject to in-plane close-bending moments[C]// Omnibus of Technology Study Development on Pressure Piping, Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2010: 37—41. (in Chinese)
- [8] 陈孙艺. 偏心异径管在扭矩作用下的弹性应力及极限扭矩解析解[C]//第 19 届全国结构工程学术会议论文集. 北京: 工程力学杂志社, 2011(I): 255—258.
Chen Sunyi. Elastic stresses and limit twisting moments of eccentric reducers subject to twisting moments [C]// Proceedings of the 19th National Conference on Structural Engineering (No. I), Beijing: Engineering Mechanics Publishing House, 2011(I): 255—258. (in Chinese)
- [9] Chen Sunyi, Liu Cengdian, Chen Jin, He Luwu. Elastic stresses and limit twisting moments of reducing elbows subject to twisting moments [C]// Proceedings of the 12th International Conference on Pressure Vessel Technology. Korea, 2009, SA4-3: 538—543.
- [10] 陈孙艺. 屈服极限和流变应力以及塑性极限载荷的确定方法综述[C]//压力管道技术研究进展精选集. 北京: 机械工业出版社, 2006: 60—66.
Chen Sunyi. Method summarize to obtain the yield limit and the flow stress and the plastic limit load of structure [C]// Omnibus of Technology Study Development on Pressure Piping, Beijing: Machine Industry Publishing House, 2006: 60—66. (in Chinese)

(上接第 346 页)

- [3] Aronsen K H, Larsen C M. Hydrodynamic coefficients for in-line vortex induced vibrations [C]// Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering 2007, ASME (COR), 2007, 3: 949—956.
- [4] 孟昭瑛, 杨树耕, 王仲捷. 水下管道涡激振动的实验研究[J]. 水力学报, 1994, 7: 43—50.
Meng Zhaoying, Yang Shugeng, Wang Zhongjie. An experimental study on vortex-excited vibration of subwater pipeline [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 7: 43—50. (in Chinese)
- [5] 余建星, 罗延生, 方华灿. 海底管线管跨段涡激振动响应的实验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(4): 93—97.
Yu Jianxing, Luo Yansheng, Fang Huacan. A test study on dynamic response of submarine pipeline spans[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(4): 93—97. (in Chinese)
- [6] Datta T K, Mashaly E A. Transverse response of offshore pipelines to random ground motion [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1990, 19(2): 217—228.
- [7] 周晶, 李昕, 马恒春, 等. 地震时海底悬跨管道动力特性试验研究[J]. 水利学报, 2003(1): 12—16.
Zhou Jing, Li Xin, Ma Hengchun, et al. Experiment study on dynamic characteristics of free spanning submarine pipelines due to earthquake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(1): 12—16. (in Chinese)
- [8] 董汝博, 周晶, 冯新. 部分悬跨海底管道多点输入地震反应分析[J]. 振动工程学报, 2008, 21(2): 146—151.
Dong Rubo, Zhou Jing, Feng Xin. Multi-input seismic analysis of partly spanning submarine pipelines [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(2): 146—151. (in Chinese)
- [9] 李明高. 基于水动力模型的海底悬跨管道地震反应分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
Li Minggao. Seismic response analysis of free spanning submarine pipelines based on hydrodynamic force model suitable for earthquake [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [10] GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011-2010, Code for seismic design of building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)