

文章编号: 1000-4750(2015)12-0099-09

# 海底跨断层输气管道动力特性数值模拟与分析

徐龙军, 刘庆阳, 谢礼立

(哈尔滨工业大学(威海)土木工程系, 山东 威海 264209)

**摘 要:** 为丰富对活动断层作用下海底管道的受力特性认识, 考虑管土材料非线性与几何非线性特征, 采用通用有限元软件 ABAQUS 严格模拟管土之间的相互作用; 按照应变控制准则, 结合管道屈曲破坏、极限拉伸破裂等的破坏形式, 系统分析了海底走滑断层作用下管道在不同设计参数情况下的位移、应力应变分布情况, 得到了不同条件下管道发生破坏时的极限断层位移。最后基于分析结果提出了适用于海底管线设计和运营的一些建议。

**关键词:** 海底管道; 走滑断层; 管土相互作用; 有限元模型; 参数设计

中图分类号: P756.2 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.05.0413

## NUMERICAL SIMULATION AND ANALYSIS FOR SUBMARINE PIPELINE SYSTEMS CROSSING ACTIVE STRIKE-SLIP FAULT

XU Long-jun, LIU Qing-yang, XIE Li-li

(Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai, Shandong 264209, China)

**Abstract:** To get some insight into the response of the submarine pipelines crossing active strike-slip faults, the interacting soil-pipeline system is modeled on the platform of finite element software ABAQUS. Nonlinear material behavior and large strains and displacements for both pipelines and soils are considered. With the buckling and the fracture of the pipeline included, the paper employs the strain-based criterion to obtain the distribution of the displacement, stress and strain along the pipeline, and the critical displacement of pipeline under various conditions. Finally, suggestions on submarine pipeline design and operation are given based on the analysis.

**Key words:** submarine pipelines; strike-slip fault; soil-pipeline interaction; finite element model; parameter design

随着海上油气田的开采和长距离能源输送需要, 作为运输载体的海底管道发挥着日益重要的作用。然而由于铺设在地质状况复杂的海底之下, 海底管线难免会面临着极端环境荷载的危害和影响, 其中最典型的荷载之一, 就是地震断层活动。海底管线同其他陆地埋地管线有所不同, 所承受的地震荷载主要包括地震动作用和活动断层作用下的永久变形变位, 但其所处的地质条件和环境荷载参数则更为复杂。当前的研究<sup>[1-8]</sup>多是针对陆地管线在

断层错动下的响应分析: 如 Newmark 等<sup>[1]</sup>忽略管道的弯曲变形和土的横向阻力, 假定管线只通过轴向变形来承担断层位移作用; Kennedy 等<sup>[2]</sup>考虑了土体的横向抗力作用和近断层管段基于单一曲率的弯曲变形, 但忽略了管道的弯曲刚度; Wang 等<sup>[3]</sup>考虑了管道的弯曲刚度, 将近断层管道看作弹簧铰支的弹性悬臂梁, 远端管道看作弹性地基梁处理。研究结果多认为, 相对于断层错动导致的管线大变形, 管线地震时的振动破坏及其影响可以忽略不

收稿日期: 2014-05-19; 修改日期: 2014-09-18

基金项目: 973 计划项目(2011CB013601); 国家自然科学基金项目(51178152, 51238012); 哈工大重点创新培育计划项目(HIT.KISTP.2014033); 山东省蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心项目

通讯作者: 刘庆阳(1990-), 男, 山东泰安人, 硕士生, 从事防灾减灾工程研究(E-mail: lqy434200@163.com)。

作者简介: 徐龙军(1976-), 男, 山东菏泽人, 教授, 博士, 博导, 主要从事防灾减灾工程研究(E-mail: xulongjun80@163.com);

谢礼立(1939-), 男, 上海人, 教授, 博导, 工程院院士, 国际地震工程协会副主席, 从事防灾减灾工作(E-mail: xiell@cae.cn)。

计<sup>[1-5]</sup>。从研究方法来看,埋地管线的断层作用影响主要是解析法、数值模型和实验<sup>[1-8]</sup>。解析法多建立在理想条件下,且只能分析管线穿越断层角度小于 $90^\circ$ 的情况,不能真实反应管道的受力状况。数值模拟和实验领域,冯启民等<sup>[5]</sup>进行了断层作用下管道反应的缩尺实验并采用梁单元和土弹簧结合的方法,建立了管土二维有限元模型;Shiro Takada等<sup>[6]</sup>尝试用壳单元来模拟跨断层埋地管线,较好的描述了管线截面的力学特性;刘爱文等<sup>[7-8]</sup>利用等效弹簧边界取代小变形管段,在保证精度的同时提高了计算效率。这些工作已取得了一些成果,但仍有不足之处,如通过建立弹簧模型可以考虑管土作用,但也未能严格模拟管土之间的接触特性和真实作用,未能考虑部分土体的破坏导致部分管段与土体的分离对管道约束的削弱作用等。

国内对海洋生命线工程的抗震研究相对较晚,也因此缺乏系统完善的海底管道抗震设计理论和方法,在这方面,马良<sup>[9]</sup>推导了地震动作用下海底管线应力和应变的简化计算方法,提出了一些海底管道的耐震防范措施;高福平等<sup>[10]</sup>基于水动力实验提出基于波-管-土三项耦合的海底管道在位稳定性分析方法;任艳荣等<sup>[11]</sup>通过考虑管土相互作用的二维平面模型,分析环境荷载参数对管线在位稳定性的影响并提出了判断管线侧向失稳的简易公式;孙政策等<sup>[12]</sup>改进了Newmark方法,考虑海洋环境因素,提出海底跨断层管线的理论简化计算方法。

为进一步模拟海底管线的跨断层动力行为,丰富断层活动作用下海底管线的性能和特征认识,为这类结构的抗震设计和灾害防御提供参考数据,利用通用有限元软件ABAQUS,建立管土单元之间的接触对,严格模拟管土之间的相互作用形式,考虑管道材料非线性、几何非线性以及不同海床土特性的影响,分析了管道在走滑断层作用下的力学性能。通过考虑管径、径厚比、埋深、管道内压、管道穿越断层的角度等因素对管道的影响,得到了不同设计参数下管道的不同失效模式和破坏的临界断层位移,并对研究结果进行了分析和探讨。

表1 管道钢材的应力应变参数

Table 1 Stress-Strain Characteristics of Pipelines

钢号	弹性区			弹塑性区			塑性区		
	$\varepsilon$	$E/\text{MPa}$	$\sigma/\text{MPa}$	$\varepsilon$	$E/\text{MPa}$	$\sigma/\text{MPa}$	$\varepsilon$	$E/\text{MPa}$	$\sigma/\text{MPa}$
X60	0.0024	2.1E5	465	0.04	1356	516	0.17	0	470

## 1 数值模型

### 1.1 材料力学模型

管道材料选用API-X60型钢材,考虑钢材的硬化,其本构模型参考规范,采用三折线弹塑性模型<sup>[13]</sup>(如图1)。

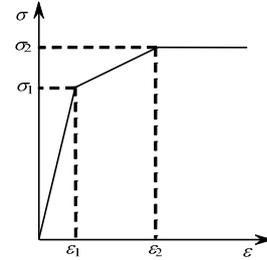


图1 管道钢材的三折线模型示意图

Fig.1 Tri-linear model sketch for pipe

海床土体模型采用Mohr-Coulomb(摩尔-库仑)模型,该模型的屈服准则:

$$F = R_{mc}q - p \tan \varphi - c = 0 \quad (1)$$

其中:

$$R_{mc} = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \varphi} \sin \left( \Theta + \frac{\pi}{3} \right) + \frac{1}{3} \cos \left( \Theta + \frac{\pi}{3} \right) \tan \varphi$$

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$$

$$q = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{3}{2}(S_x^2 + S_y^2 + S_z^2) + 3(S_{xy}^2 + S_{yz}^2 + S_{zx}^2)}$$

式中: $F$ 为屈服准则函数; $p$ 是平均应力; $q$ 是偏应力; $\varphi$ 是摩擦角; $c$ 是材料的粘聚力; $\Theta$ 是极偏角; $R_{mc}(\Theta, \varphi)$ 是与摩擦角和极偏角有关的常数; $\sigma$ 、 $s$ 分别为单元体上的正应力和偏应力。本文考虑不同特性的海床土对海底管道的影响,海床土具体参数见表2。

管道和海床土的相互作用模型用ABAQUS里的接触对功能实现<sup>[14]</sup>。接触面之间的相互作用包含两个部分:一是接触面的法向模型;二是接触面的摩擦模型。

1) 法向接触模型采用修正的硬接触模型(图2),即在传统硬接触模型中引入两个指标 $p_{\max}$ 和 $h_{\max}$ ,规定:当接触面上的拉力超过 $p_{\max}$ 时,接触面分开,接触面间的过盈量(负间隙)超过 $h_{\max}$ 时,接触面闭合。

表 2 海床土特性  
Table 2 Surrounding Soil Properties

土体类型		有效重度/(kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量/MPa	摩擦角/(°)	膨胀角/(°)	粘聚力/kPa	泊松比
黏土	软黏	8	20	5	1	50	0.35
	硬黏	8	80	0	0	50	0.35
砂土	软砂	8	20	20	2	5	0.35
	硬砂	8	80	20	5	5	0.35

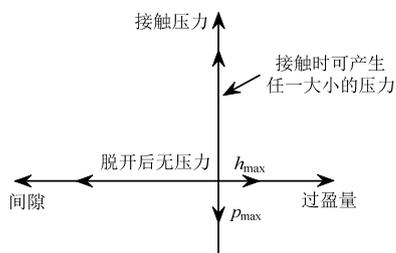


图 2 修正的硬接触模型  
Fig.2 Hard Contact Model

2) 摩擦模型采用 coulomb friction(库仑摩擦)来描述, 该模型用摩擦系数  $\mu$  表征两个面的摩擦行为。极限剪应力如下:

$$\tau_{crit} = \mu p \quad (2)$$

其中:  $\tau_{crit}$  为极限剪应力;  $p$  为接触压力, 规定: 当摩擦力大于  $\tau_{crit}$  时, 接触面间开始有相对滑移。理想情况下接触面在进入滑移阶段前没有剪切变形, 但由于临界时刻的位移不连续会导致数值模型收敛的困难, ABAQUS 引入了“弹性粘结状态”, 如图 3 所示, 允许接触面间发生少量的相对滑移, 用罚函数计算接触刚度。

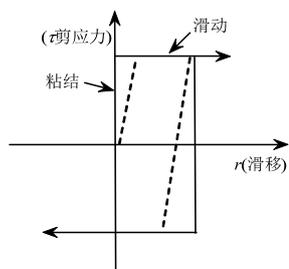


图 3 摩擦行为  
Fig.3 Friction Behavior

### 1.2 有限元模型的建立

海底管道所处环境相对于陆地埋线管道来说很是复杂, 存在海水围压、水浮力和海底稳流等作用, 海底管道的边界条件也较为复杂多变。为简化起见, 做出如下假设: 1) 海底管线水平铺设, 周围海床土为各项同性的饱和土。2) 考虑管道保护层、配重层等附加重力作用, 忽略其对管道刚度的贡献; 3) 忽略海底稳流的动力作用, 只考虑压强和浮力作用。

本文主要考虑断层附近的大变形管段, 采用刘

爱文等<sup>[7-8]</sup>提出的等效弹簧边界代替小变形管段的影响, 经初步试算, 海床土尺寸取 8 m×5 m×40 m, 采用三维实体减缩积分单元(C3D8R)模拟; 管道长度取 40 m, 采用壳单元(S4R)来模拟。如图 4 所示, 靠近断层面的管段和土体单元需细分, 远离断层面的单元网格较粗糙, 在确保大变形甚至扭曲时网格质量的同时, 提升模型运算速度。

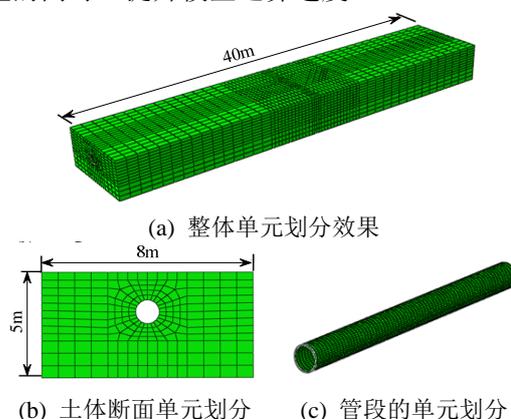


图 4 有限元模型

Fig.4 Finite Element Model

土体的侧面约束其法线方向的自由度, 底面约束 3 个平动自由度, 顶面为自由表面; 管线两端施加等效弹簧边界, 即将计算得到的等效弹簧以并联的形式平均分配到管端的单元节点, 弹簧另一端为固定端。模型的加载分以下步骤: 施加重力荷载; 施加海洋环境荷载和管道工作内压; 施加断层作用(采用位移控制加载的方式实现<sup>[7]</sup>)。

## 2 仿真分析

### 2.1 管道失效模式和破坏准则

海底管道的失效模式主要包括: 拉伸破裂极限状态、椭圆度极限状态破坏、局部和整体屈曲破坏等<sup>[15]</sup>。本文主要考虑拉伸破坏和局部屈曲的影响, 针对不同的参数设计选择合适失效模式作为判断依据。

目前管道采用的设计准则主要包括两类: 基于应力的设计准则和基于应变的设计准则<sup>[16-17]</sup>。传统的管道设计采用应力设计准则, 即基于一定安全余量的考虑, 管材所承受的荷载不应超过其本身的屈

服应力限值(见式(3)).但是对于诸如断层运动、滑坡、砂土液化等位移控制的加载方式,应力控制法的弊端也就暴露<sup>[17]</sup>:应力达到一定限度后,其对位移荷载不再敏感,此时在相同应力情形下会产生不同应变值,安全系数过大会导致材料性能不能充分发挥;安全系数过小,管材应变容易超过允许应变值,从而引发一系列安全问题。

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{aa}^2 + \sigma_{bb}^2 - \sigma_{aa}\sigma_{bb} + 3(\tau_{ab}^2 + \tau_{ac}^2)} \leq k\sigma_s \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{eq}$  为 Mises 应力;  $\sigma_s$  为屈服应力;  $\sigma_{aa}$  为轴向正应力;  $\sigma_{bb}$  为环向正应力;  $\sigma_{cc}$  为径向正应力(在 S4R 单元模型中为 0);  $k$  为安全系数。

挪威船级社(DNV)、加拿大标准协会(CSA)等均对次做出了修改<sup>[18-19]</sup>:对于受位移或者变形控制的管道,应采取基于应变的设计方法。相对于应力设计准则,有如下优点:在复杂荷载作用下,特别是当管道进入高应力状态时,应变对荷载的敏感度逐步提高;其次,对于钢材这类延性较好的材料,其变形会一定程度上削弱外荷载的作用效应,此时管线的应力值会产生一定程度的降低,作为失效判据说服力显得不足;再者,为节约成本,管道设计时有时允许管线应力超过屈服值进入塑性阶段,在保证管线安全运营的基础上,适度发挥钢材的变形能力。本文采用 CSA<sup>[19]</sup>给出的拉伸和局部屈曲判据进行应变设计,见下式:

$$\varepsilon^{crit} = 0.5 \frac{t}{D} - 0.0025 + 3000 \left( \frac{0.4\sigma_s}{E} \right)^2 \quad (4)$$

$$\varepsilon_{tu} = \delta^{(2.36-1.58\lambda-0.101\xi\eta)} (1 + 1.61\lambda^{-4.45}) \cdot (-0.157 + 0.239\xi^{-0.241}\eta^{-0.35}) \quad (5)$$

其中:  $\varepsilon^{crit}$  为临界屈曲应变值;  $\varepsilon_{tu}$  为临界拉伸应变值;  $\lambda$  为屈强比;  $\eta$  为缺陷长度;  $\xi$  为缺损高度;  $\delta$  为 COTO 指标。

本文模型所采纳的具体数值参见表 3。

表 3 不同径厚比的管道设计准则表

Table 3 Pipeline design criteria for different diameter-thickness

$D/t$	$\varepsilon^{crit}/(\times 10^{-3})$	$\sigma_{eq}/\text{MPa}$	$\varepsilon_{Tu}$
70	7.0		
80	6.1		
90	5.3	465	0.025
100	4.8		
110	4.4		

### 2.2 管道参数分析

由于本文探讨的因素的多样性和非相关性,需要设置多组对比试验来进行参数设计,因此需要一

个基本模型作为参照对象。本文选取的基本模型为管道长度 40 m, 直径  $D=900$  mm, 管壁厚度  $t=10$  mm, 工作压强取 5 MPa; 海床选取软黏土; 管线垂直穿越断层带; 实施位移控制加载, 最大错动量经初步试验取为 1.5 m。

#### 1) 断层错动量

取基本模型进行试验,分析管道在不同断层错动量下的响应。图 5 给出  $d=1.5$  m 时的位移云图,可看出在断层面附近,管道和海床土是脱离的。图 6 给出了管线在不同断层错动量下沿管轴方向的响应分布。随着错动位移  $d$  的增加,管线的横向变形随之增大,应力应变也逐渐增加。管线存在两个危险点,分布在断层面两侧附近区域,受拉一侧首先达到屈服点,但是管道的破坏是由受压侧的壳型屈曲控制的。从图 6 还可得出:相对于沿管线 Mises

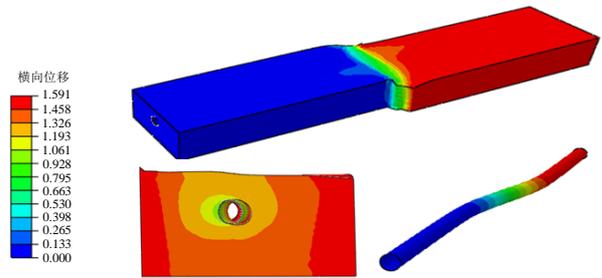
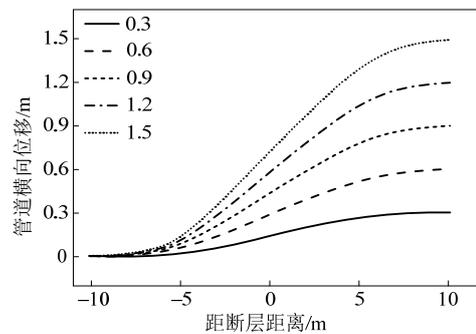
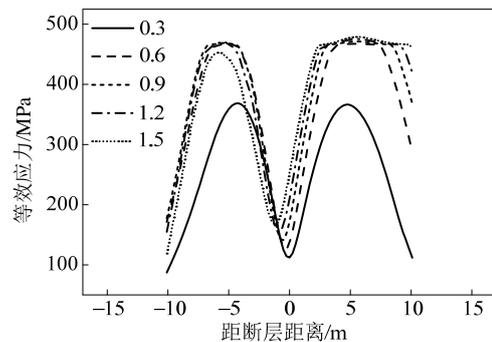


图 5 断层作用下管土模型的变形

Fig.5 Deformation of the pipe-soil system after application of fault displacement



(a)



(b)

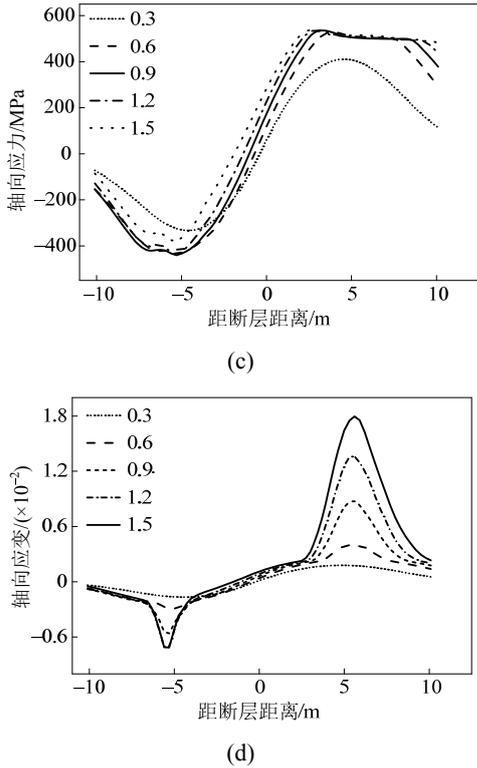


图 6 不同断层错动距离下管道的响应分布

Fig.6 Variation of mechanical response along the pipeline for different values of fault displacement

应力的分布，应变对于断层作用更加的敏感，并且有很广泛的适用范围，这也体现了应变设计相对于应力设计的优越性。

2) 穿越角度

本文探讨了走滑断层两类穿越角度对管线承载能力的影响。定义  $a$  为管线轴向与断层面法线的夹角。当  $a < 0$  时，断层错动使管线有挤压的趋势； $a > 0$  时，断层错动使管线有拉伸趋势。本文分别探讨了当  $a = \pm 5^\circ$ 、 $a = \pm 10^\circ$ 、 $a = \pm 15^\circ$ 、 $a = \pm 20^\circ$ 、 $a = \pm 30^\circ$  时，管线的响应，详见图 7。

图 7(a)和图 7(b)给出了  $a < 0$  时的管线的应力应变响应分布。随着  $|a|$  的增大，管线在受压侧率先形成位移突起，管线横向变形趋于“Z”型。随着角度的继续增加，管道轴向挤压趋势更明显，从图 7(a)可以看出， $a = 30^\circ$  时，管道横向位移峰值明显减小。图 7(b)中，随着角度增大，管道受压发生壳式屈曲的长度明显增加， $a = 30^\circ$  时，断层面两侧附近的管段均出现屈曲破坏。当  $a > 0$  时，管线的横向变形呈“S”型， $a$  的增加对管道横向变形的影响不明显，基本分布在一个窄带范围内(图 7(c))。图 7(d)中，在相同断层位移下， $a$  的增加使拉伸成为管道的主要受力趋势， $a \geq 10^\circ$  时，近断层管段不存在压

应变，此时管道不会发生屈曲破坏；并且应变曲线峰值点逐步向断层面靠拢，其包络面积也逐步增大，此时管道会在断层交界面上发生拉伸破坏。图 8 给出了不同  $a$  值下，管道的临界断层位移分布。

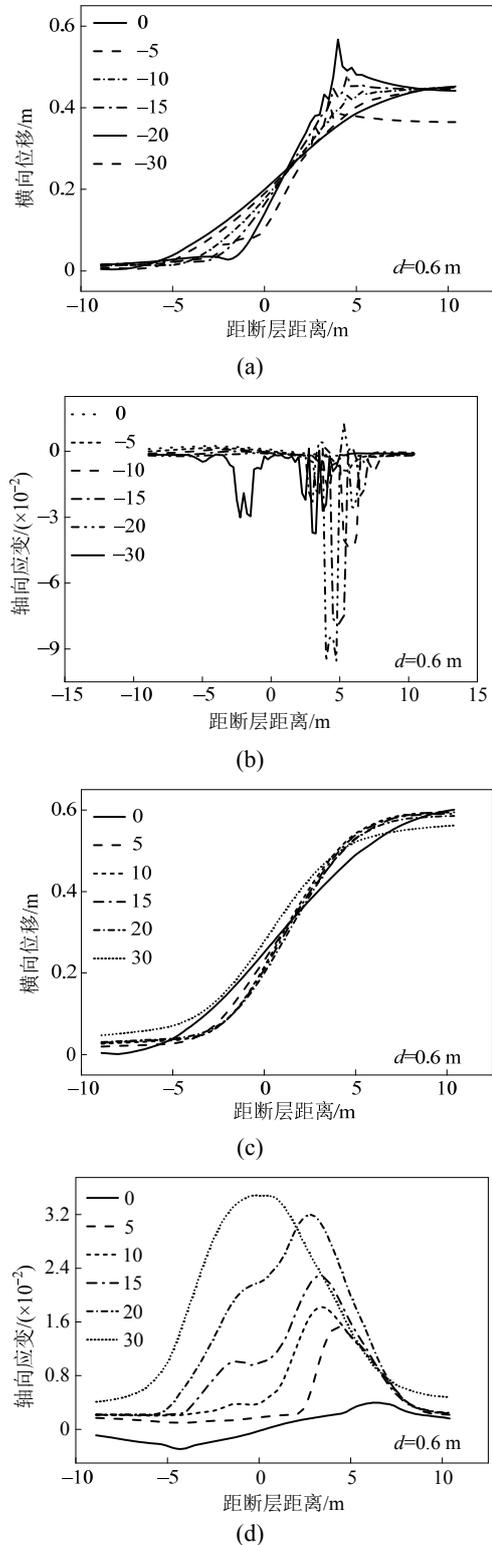


图 7 不同穿越角度下管道的响应分布

Fig.7 Variation of mechanical response along the pipeline for different values of angles

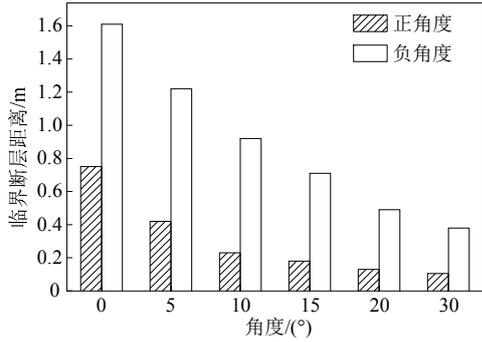


图8 不同穿越角度下管道破坏的临界断层位移  
Fig.8 Critical fault displacement of pipeline for different values of angles

随着  $a$  值的增加, 管线破坏时的临界断层位移在减小, 穿越角度为  $90^\circ$  时, 即  $a=0$  时是最好的; 管线对负角度的变化更敏感, 在挤压趋势下, 管道容易发生壳式屈曲破坏, 对断层的适应能力明显降低。

3) 埋深

海底管道的铺设, 根据埋深可以分为3种: 深埋、浅埋和不埋。本文取埋深  $H$  分别为 0 m、0.5 m、1 m 和 1.5 m 等4种情形进行分析。图9可看出:  $H$  越大, 管道的横向变形和轴向应变也越大, 这是由于覆盖土层越厚, 管土之间的接触压力增大从而导致管道的受约束程度增强。图9(a)中  $H=0$  时, 固定

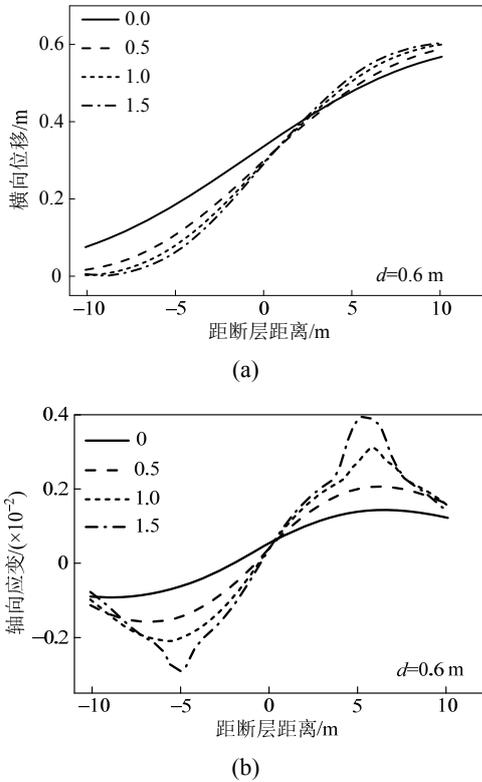


图9 不同埋深下管道的响应分布  
Fig.9 Variation of mechanical response along the pipe for different values of depths

盘的管道也发生了较大的位移错动, 说明海床土的约束作用并非越小越好, 此时管线更易发生整体失稳。图10可以看到:  $H=0$  时, 管线并未达到屈服, 埋深越大, 临界位移越小。

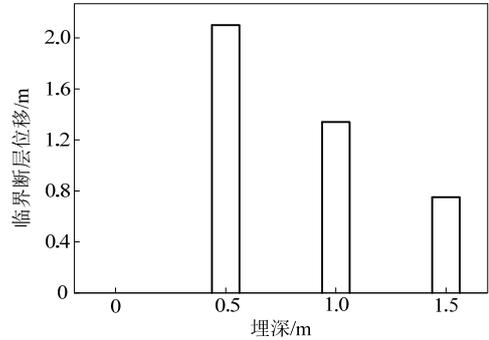


图10 不同埋深下管道破坏的临界断层位移  
Fig.10 Critical fault displacement of pipeline for different values of buried depths

4) 管径的影响

本文案例给出了  $D$  取 600 mm、700 mm、800 mm、900 mm、1000 mm、1200 mm 时管道的响应分布。随着  $D$  的增大, 管线的变形逐渐减弱, 曲线拐点逐渐远离断层面, 说明吸收变形的管段在变长。图11(b)中: 管径减小, 使应变峰值点内移, 并且峰值也随之增大, 管道抵抗变形的能力减弱。

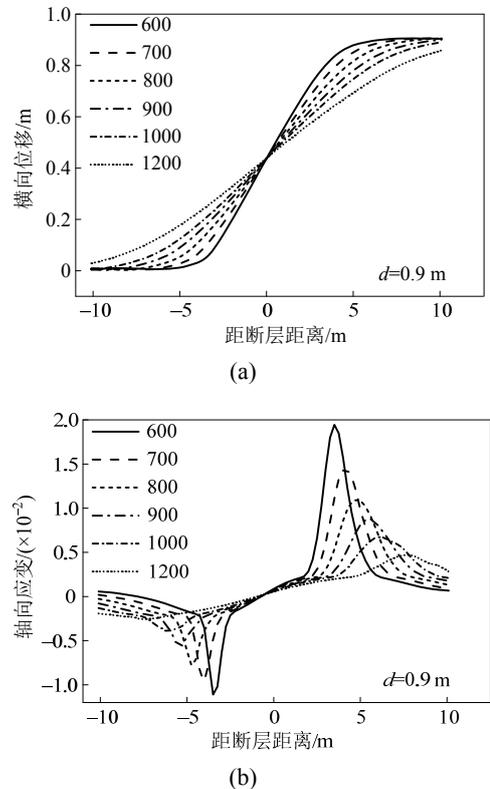


图11 不同管径下管道的响应分布  
Fig.11 Variation of mechanical response along the pipeline for different values of diameters

这是因为：管径的增大，增加了管道的抗弯刚度，但也增加了管土的接触面积，土体的约束作用也随之增强。但是，抗弯刚度的增加做出的贡献远超过约束增强带来的负面影响。

5) 径厚比的影响

管道径厚比变化的影响具体如图：图 13(a)可以看出， $D/t$  对管道横向变形的影响并不明显。图 13(b)中随着  $D/t$  的增大，管道的峰值应变也在增大，并且管道峰值点有逐步向断层面靠拢的趋势。相对拉伸应变，管道弯曲导致的压缩应变成为主要控制因素。管壁越薄，管道截面抗弯刚度越小，导致在相同断层错动作用下，管道更容易出现薄弱位置，断

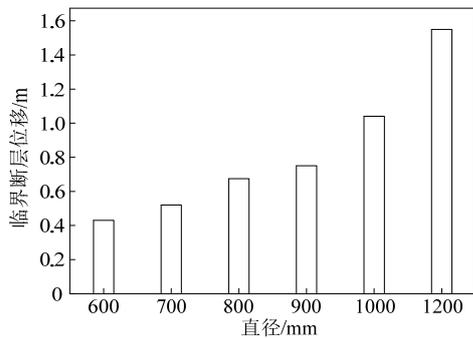


图 12 不同管径下管道破坏的临界断层位移  
Fig.12 Critical fault displacement of pipeline for different values of diameters

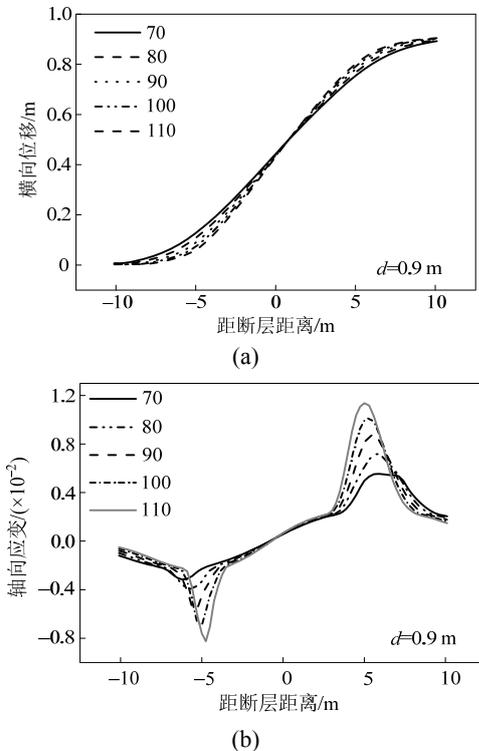


图 13 不同径厚比下管道的响应分布  
Fig.13 Variation of mechanical response along the pipeline for different values of diameter-to-thickness

层错动继续增大，管道在薄弱位置处会被剪断。图 14 临界断层位移分布也说明了这个问题。

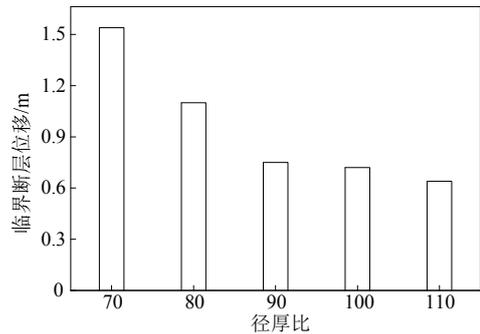


图 14 不同径厚比管道破坏的临界断层位移  
Fig.14 Critical fault displacement of pipeline for different values of diameter-to-thickness

6) 管道内压的影响

压强的影响，用管道内外的压力差  $\Delta P$  来描述。图 15(a)可以看出，管内压强的增大对管线的变形影响并不显著，但当压强达到一定程度后，管线的横向位移形状变得更饱满。图 15(b)中：当  $\Delta P=10$  MPa 时，在该断层错动的水平下，管内工作压力成为影响管线安全的控制因素。结论：在一定压强范围内，管线趋于安全，但当超过规定限值时，管道更易发生破坏，这是因为压强的增加，使得管线环向应力增大，管道较之前变得“更脆”。

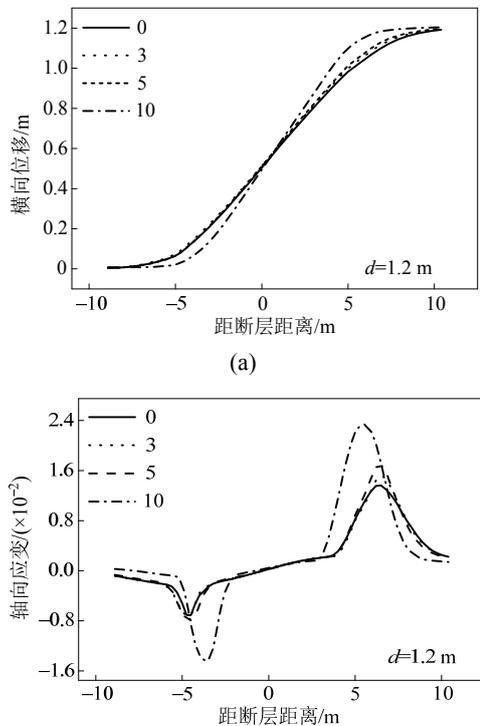


图 15 不同内压下管道的响应分布  
Fig.15 Variation of mechanical response along the pipeline for different values of pressure

### 7) 海床土特性

本文针对海床土不同类型可能会对管道响应造成的影响, 主要对两种常见且区分度明显的土体类型(砂土和黏土)进行了对比分析, 并且考虑了密实与稀疏两种状态。图 16 可以明显看出, 相同断层错动下, 位于黏土中的管道变形剧烈, 砂土环境中由于管线主要用来吸收断层能量的管段更长, 因此变形更平稳。图 16(c)中,  $d=0.9\text{ m}$  时, 位于砂土的管道几乎未进入塑性阶段, 而黏土中管道已有较大的塑性变形。因此可推断: 黏土对管线约束强是基于其自身粘聚力的发挥, 相对于摩擦角来说, 其对管道约束的影响程度更大。此外, 从图 16 和图 17

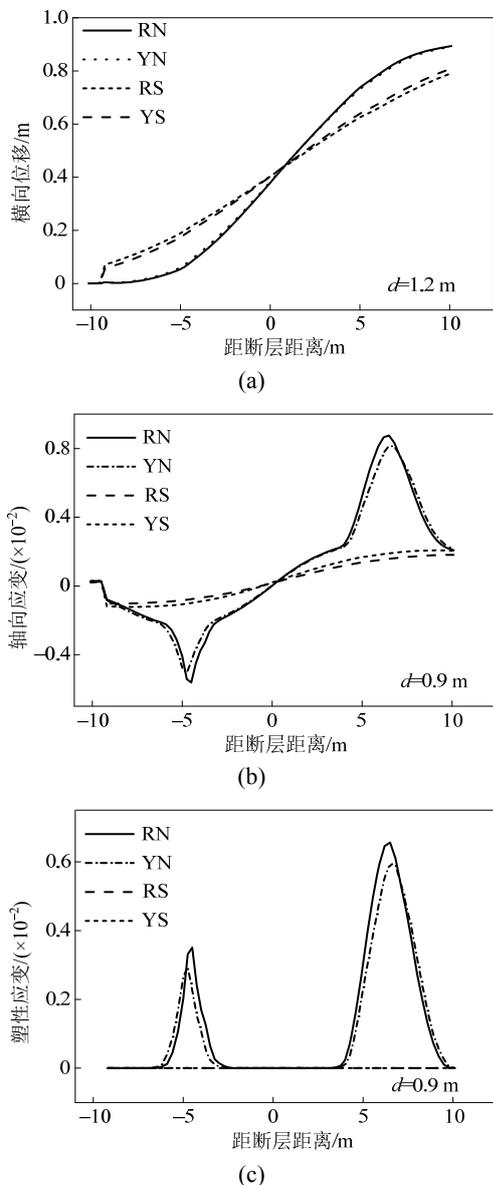


图 16 不同海床土下管道的响应分布

Fig.16 Variation of mechanical response along the pipeline for different types of seabed

还可得到, 随着弹性模量  $E$  的增加, 管土的约束作用也是增加的, 只是相对海床土类型的影响, 变化不是很显著。

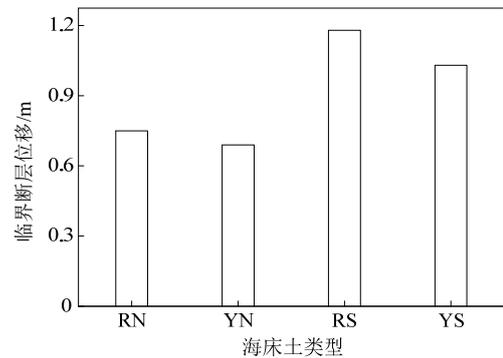


图 17 不同海床土下管道破坏的临界断层位移

Fig.17 Critical fault displacement of pipeline for different types of seabed soil

## 3 结论

(1) 利用 ABAQUS 软件, 在考虑管道材料非线性和几何非线性基础上严格模拟了海底管道的管土相互作用模型, 通过应变设计准则, 给出了不同条件下管道破坏的临界断层位移。

(2) 海底管道在活动断层作用下的破坏发生在断层面两侧。海底管道与断层面的交角很大程度上决定着管线的失效模式和相应的判断标准:  $\alpha \leq 0^\circ$  时, 管道发生局部屈曲破坏;  $\alpha > 0^\circ$  时, 管道发生拉伸破裂。分析得到: 海底管道垂直穿越走滑断层时, 管道的破坏程度最低。

(3) 由参数设计和灵敏度分析得到: 可以通过适度增大管径、增加管壁厚度、控制管道工作压力、合理选择管道埋深等方法, 增加海底管线的抗弯刚度和减弱管土相互作用强度, 从而增强海底管道对断层活动的适应能力。

(4) 海床土特性对管线的影响不可忽略。相对砂土环境, 埋于黏土环境的海底管线在相同断层错动下会产生更大的变形, 管道更易发生破坏。相对土体特性, 海床土的弹性模量对管道的影响较弱。

### 参考文献:

- [1] Newmark N M, Hall W J. Pipeline design to resist large fault displacement [C]// Proceedings of US Conference on Earthquake Engineering. Ann Arbor, Michigan, 1975: 416-425.
- [2] Kennedy R P, Chow A W, Williamson R A. Fault movement effects on buried oil pipeline [J]. ASCE Journal of Transportation Engineering, 1977, 103(5):

- 617—633
- [3] Wang L R L, Wang L J. Parametric study of buried pipelines due to large fault movements [C]// Proceedings of the 3rd Trilateral China-Japan-U.S. Symposium on Lifeline Earthquake Engineering. Kunming, China, 1998: 165—172.
- [4] 孙绍平, 韩阳. 生命线地震工程研究述评[J]. 土木工程学报, 2003, 36(5): 97—104.  
Sun Shaoping, Han Yang. State-of-the-art of the research on lifeline earthquake engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(5): 97—104. (in Chinese)
- [5] 冯启民, 郭恩栋, 宋银美, 等. 跨断层埋地管道抗震试验[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(1): 56—62.  
Feng Qimin, Guo Endong, Song Yinmei, et al. A seismic test of buried pipe crossing fault [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(1): 56—62. (in Chinese)
- [6] Shiro Takada, Hassani Nemat, Fukuda Katsumi. A new proposal for simplified design on buried steel pipes crossing active faults [J]. Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, 2001, 668(54): 187—194.
- [7] 刘爱文, 胡聿贤, 李小军, 等. 大口径埋地钢管在地震断层作用下破坏模式的研究[J]. 工程力学, 2005, 22(3): 82—87.  
Liu Aiwen, Hu Yuxian, Li Xiaojun, et al. Damage behavior of large diameter buried steel pipelines under fault movements [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(3): 82—87. (in Chinese)
- [8] 王滨, 李昕, 周晶. 走滑断层作用下埋地钢质管道反应的改进解析方法[J]. 工程力学, 2011, 28(12): 51—58.  
Wang Bin, Li Xin, Zhou Jing. Buckling analysis of buried pipeline subject to reverse fault crossings [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(12): 51—58. (in Chinese)
- [9] 马良. 海底油气管道工程[M]. 北京: 海洋出版社, 1987: 245—262.  
Ma Liang. The seabed oil and gas pipeline project [M]. Beijing: China Ocean Press, 1987: 245—262. (in Chinese)
- [10] 高福平, 顾小芸, 浦群. 海底管道失稳过程的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 304—308.  
Gao Fuping, Gu Xiaoyun, Pu Qun. Experimental research on the instability process of submarine pipelines [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 304—308. (in Chinese)
- [11] 任艳荣, 刘玉标, 顾小芸, 等. 弹塑性海床上的管土相互作用分析[J]. 工程力学, 2004, 21(2): 84—87.  
Ren Yanrong, Liu Yubiao, Gu Xiao-yun, et al. Analysis of pipe/soil interaction on elastic-plastic seabed [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(2): 84—87. (in Chinese)
- [12] 孙政策, 段梦兰, 张文, 等. 地震波条件下海底管线抗震设计方法的研究[J]. 石油学报, 2005, 26(2): 115—118.  
Sun Zhengce, Duan Menglan, Zhang Wen, et al. Design methods for subsea pipelines against earthquakes waves [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(2): 115—118. (in Chinese)
- [13] SY/T0450-2004. 输油(气)钢质管道抗震设计规范[S]. 北京: 石油工业出版社, 2004.  
SY/T0450-2004. Code for seismic design of oil and gas steel pipeline[S]. Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [14] ABAQUS User's Manual [M]. RI, USA: Simulia Providence, 2009: 579—623.
- [15] 中国船级社. 海底管道结构分析指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006: 34—45.  
China Classification Society. code for analysis of submarine pipeline structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2006: 35—45. (in Chinese)
- [16] 金浏, 李鸿晶. 逆冲断层作用下埋地管道屈曲分析[J]. 工程力学, 2011, 28(12): 98—104.  
Jin Liu, Li Hongjing. Buckling analysis of buried pipeline subject to reverse fault crossing [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(12): 98—104. (in Chinese)
- [17] 李璞, 陶燕丽, 周建. 基于应变设计管道局部屈曲应变极限值的计算[J]. 天然气工业, 2013, 33(7): 101—107.  
Li Pu, Tao Yanli, Zhou Jian. A study of the ultimate compressive strain of local buckling in strain-based design of pipelines [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(7): 101—107. (in Chinese)
- [18] Veritas Det Norske. DNV OS-F101 offshore standard-submarine pipeline systems [S]. Norway: DNV, 2007.
- [19] Canadian Standards Association. CSA-Z662-2007 Oil and gas pipeline systems [S]. Toronto: CSA Group, 2007.