

# 海底管道穿越地震断层分析方法探讨

黄水祥<sup>1\*</sup>, 张 勋<sup>2</sup>, 冯郁雯<sup>3</sup>, 刘斗来<sup>1</sup>, 宋凤钊<sup>1</sup>, 王占春<sup>1</sup>, 李卫东<sup>1</sup>

(1. 中国石油管道工程有限公司天津分公司, 天津 300457;

2. 中油管道物资装备有限公司, 河北 廊坊 065000;

3. 中国石油管道局工程有限公司, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**归纳总结了管道穿越地震断层的分析方法及相关抗震设计规范,通过梳理海底管道与陆上管道在穿越地震断层分析上的差异,提出了海底管道穿越地震断层分析的推荐做法。依托工程案例,采用有限元方法,开展了地震断层作用下海底管道响应分析,并给出了设计优化建议。

**关键词:**海底管道;地震断层;有限元

**中图分类号:** P751

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2017)11-0213-06

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.11.050

## Analysis methods for seabed pipeline passing through seismic fault

HUANG Shui-xiang<sup>1\*</sup>, ZHANG Xun<sup>2</sup>, FENG Yu-wen<sup>3</sup>, LIU Dou-lai<sup>1</sup>, SONG Feng-zhao<sup>1</sup>,  
WANG Zhan-chun<sup>1</sup>, LI Wei-dong<sup>1</sup>

(1. Tianjin Design Institute, China Petroleum Pipeline Engineering Company Limited, Tianjin 300457, China;

2. China Petroleum Pipeline Material and Equipment Company Limited, Langfang 065000, China;

3. China Petroleum Pipeline Engineering Company Limited, Langfang 065000, China)

**Abstract:** This paper summarizes the analysis methods and relevant seismic design codes for pipeline crossing seismic fault. Based on the differences between seabed pipeline and onshore pipeline in analysis on crossing seismic fault, the recommended practices are proposed for analysis on seabed pipeline crossing seismic fault. For a given project case, the response of seabed pipeline subjected to seismic fault is analyzed by using the finite element method, and related design optimization measures are proposed.

**Key words:** seabed pipeline; seismic fault; finite element

国内某海底天然气管道工程拟定路由穿过地震断层,断层类型为正断层,最大错动量 2.94 m,断层位于水深约 50 m 位置,海床表层土为淤泥夹砂。管道规格  $\Phi 813 \times 25.4$  mm,设计压力 14 MPa,设计温度 70℃。管材采用 API 5L X65 PSL2 SAWL,3 层 PE 防腐,穿越断层处管道混凝土配重层厚度 100 mm,密度 3 040 kg/m<sup>3</sup>。断层地震活动可能导致管道发生扭曲、皱折甚至断裂,使管道发生泄漏和被迫中断,对管道安全带来极大威胁。

相对于陆地管道抗震设计方法的研究,各国学者和工程师在海底管道方面的研究工作要少得多。国际上每年 1 次的海洋技术会议(OTC)、海洋力学和极地工程会议(OMAE)、近海与极地工程会议(ISOPE)、深海技术会议(DOT)中,关于海底管道穿越地震断层的抗震研究主要集中在管土之间相互作

用的分析上。至今为止,还没有专门针对海底管道抗震设计的规范,DNV(挪威船级社)、ABS(美国船级社)、API(美国石油协会)等海底管道规范仅要求:如果管道铺设在地震带要考虑地震载荷的影响。由于针对性和系统性不强,并没有形成工程上可实际应用的海底管道抗震设计方法。因此,国际上的管道工程设计部门在进行海底管道的抗震设计时,基本参照陆地管道规范进行抗震设计。

为解决工程设计中面临的实际问题,本文中针对海底管道穿越地震断层分析方法进行研究探讨。

## 1 海底管道穿越地震断层分析方法选择

### 1.1 管道穿越地震断层分析方法

管道穿越地震断层分析方法分理论解析计算方法和有限元数值仿真方法。

收稿日期:2017-09-14

作者简介:黄水祥(1990-),男,硕士生,工程师,主要从事海底管道结构设计及管道在位稳定性研究工作,通讯联系人,022-60901859, huangshuixiang@cpptj.com。

### 1.1.1 理论解析计算方法

断层作用下的理论解析计算主要方法有 Newmark-Hall 法、Kennedy 法和王汝梁法。

#### (1) Newmark-Hall 法

Newmark 等<sup>[1]</sup>于 1975 年首次提出应用静态土压力和静态摩擦力的小位移模型分析断层错动对埋地管道影响的理论方法。主要研究结论包括:管道的大部分位移和变形发生在断层两侧很短的范围内;管土之间摩擦角越小,抗震能力越高;厚壁管道具有较好的抗震性能;宜减小管道的埋置深度。同时,该方法认为,管道横截面以轴向拉应变为主,管道与断层交角在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内越大越好,考虑到断层的不确定性,应以  $80^\circ$  为最佳。该方法已经被我国及美国输油(气)管道抗震规范所采用。

但由于该方法忽略管道的弯曲变形和管土之间的相互作用,认为断层位移完全由管道的纵向变形吸收,使得其只适用于断层与管道交角较小或断层位错较大的情况。

#### (2) Kennedy 法

Kennedy 等<sup>[2]</sup>考虑管土横向相互作用,改进了 Newmark 和 Hall 的方法。基于单一曲率模型,将管道看成只有拉伸刚度而无弯曲刚度的悬链线,应用大位移理论计算管道的弯曲应变,结果较前者更为合理。

然而,该方法忽略了管道的弯曲刚度以及弯曲变形对轴向刚度的影响,过高地估计了土体侧向阻抗对弯曲应变产生的效应,在弯曲变形与轴向变形之比较小时可给出满意的结果,但在弯曲变形较大时则过于保守。

#### (3) 梁理论方法(王汝梁法)

Wang 等<sup>[3]</sup>把变形后的管道简化为给定变形的单一曲率弯曲大变形梁和弹性地基梁,考虑了管道的抗弯刚度和管土相互作用,采用管线钢三折线模型,得到管道的应力分布、伸长量以及弯矩与曲率半径的关系,并进一步分析了断层位移、穿越角、管土摩擦作用、管道埋深以及管径对管道轴力与弯矩的影响,最后建议采用大穿越角、小埋深、小直径以及小管土摩擦角为宜。

该方法虽改进了 Kennedy 等的研究,但仍存在下列不足:忽略了轴力对管道弯曲刚度的不良影响和单一曲率大变形梁和弹性地基梁之间的剪力连续条件;管道潜在破坏的位置也不是位于断层两侧大变形段的两端,而实际上应该位于大变形段内,靠近

断层与管道的交叉点;依据断层位移来计算管道弯矩抗力,而实际上断层位移与管道的变形存在一定差异,应直接采用管道应变或变形计算管道弯矩抗力。

### 1.1.2 有限元数值仿真方法

国内外研究中所采用的数值模型大致可分为梁式模型和壳式模型。梁模型构造简单,计算时间短;壳模型与梁模型相比,能更好地分析管道局部屈曲等大变形情况。但是壳模型构造复杂,需要的计算时间比梁模型长得多,不适用于大型工程计算。在保证精度的条件下,一些学者为减少计算时间、优化时间配置,提出了壳梁单元混合模型。该类模型较梁式模型和壳式模型构造更为复杂,需要考虑壳单元和梁单元之间的相容性,而且管道壳单元计算长度的确定也尚有争议,实际计算时需试算得到。刘爱文等<sup>[4]</sup>提出了壳有限元分析的等效边界方法,减小了管道计算长度,但是在确定等效边界非线性弹簧的本构关系时没有考虑到管线钢屈服之后的强化阶段,限制了等效边界分析模型管道计算长度的进一步减小。

## 1.2 国内外管道抗震设计规范对比

关于结构抗震理论,美国和日本的规范经 30 年的发展已经具有世界影响力,对于我国抗震规范的发展与研究有着重要的参考价值。以中、美、日 3 国的埋地管道抗震设计规范进行比较,包括:①中国《输油(气)钢质管道抗震设计规范》(SY/T 0450—2004)<sup>[5]</sup>;②中国《油气输送管道线路工程抗震技术规范》(GB 50470—2008)<sup>[6]</sup>;③中国《室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》(GB 50032—2003)<sup>[7]</sup>;④美国生命线大联盟(ALA)《Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe》(2001)<sup>[8]</sup>;⑤美国国际管道研究协会(PCI)《Guidelines for the Seismic Design and Assessment of Natural Gas and Liquid Hydrocarbon Pipelines》(2004)<sup>[9]</sup>;⑥美国土木工程师学会(ASCE)《Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems》(1984)<sup>[10]</sup>;⑦日本 Japan《Earthquake Resistant Design Codes in Japan》(2000)<sup>[11]</sup>。

对于以上规范的汇总见表 1。在断层作用分析方法中,主要是 Newmark-Hall 法和 Kennedy 法 2 种解析方法;至于有限元法则以梁单元或壳单元为主建立数值仿真计算模型。

表1 中、美、日规范关于断层作用分析汇总表

规范	解析方法	有限元方法	抗震措施
SY/T 0450—2004	Newmark-Hall 法(比较管道变形)	无	有
GB 50470—2008 输气管道	Newmark-Hall 法(比较管道应变; 2倍管道最大应变)	有	有
GB 50032—2003 给水排水、燃气	无	无	有
ALA—2001	无	有	无
PRCI—2004	无	有	有
ASCE—1984	Newmark-Hall 法、Kennedy 法	有	有
Japan—2000	有	无	无

### 1.3 海底管道与陆上管道穿越地震断层分析的差异

海底管道可以被认为是埋地管道的一种特殊情况,原理与陆上埋地管道相同,海底管道穿越地震断层,分析方法与陆上埋地管道相似,可以参照陆地埋地管道抗震设计的方法进行验算。不同的是周围所处的环境,海洋环境与陆上埋地环境存在着明显的差异,主要体现在以下4点。

(1)海底管道需要考虑海床土的孔隙水压力,而陆地管道由于埋深浅一般不需要考虑。

(2)由于海洋环境的特殊性,海洋土与陆地土在性质上有所不同:①海底土层除有陆相成因外,还有海相成因,成因的不同必然使土壤在工程特性上有所不同;②海洋土一般是咸水饱和或接近饱和的,是一种特殊的三组分体系(土骨架+水+水中盐分)或四组分体系(再加空气),而大陆土除特殊情况外,以两组分(土骨架+水)或三组分体系(再加空气)为主,孔隙水中含盐分较少,可以忽略;③海水波浪使海床土经常受到反复荷载和水平荷载,大风暴期间这种荷载更加突出;④海洋土在发生扰动之后,性质发生变化,与原场地土性质不同。有鉴于如此多的不同之处,故在分析时需尽可能多地参考海洋土力学相关内容对工程进行分析。

(3)海底管道需要考虑外部水压对抗震极限压缩应变的折减<sup>[9]</sup>。

(4)海底管道的混凝土配重层首先会影响管道刚度及节点的应力,而陆地管道则不存在此情况;其次,陆地管道外涂层一般为PE,而海底管道最外层为混凝土,土壤对二者之间的约束作用不同。所以海底管道需针对配重层进行相应的分析。

通过数值计算和实验方法,张小玲<sup>[12]</sup>确定了地

震作用下海床中超隙水压力和管线内应力等动力响应。虽然地震作用下海床-管线的动力响应受到很多因素的影响,但是从计算结果的量级上来看,其反应是很微小的。管线外表面径向正应力最大情况下也只达到2 MPa,远远小于管道的破坏极限,故可以忽略普通区段间地震作用时海床土孔隙水压力变化时管道动力反应的影响。进行抗震分析之前,需针对专门的海洋土进行土工实现分析,在使用分析方法基本相同的条件下,海洋土与陆地土之间的差异体现在计算过程中相关参数选取的不同。海水外压对管道极限压缩应变的影响,将通过管道允许压缩应变进行相应的折减,通过此方法来考虑管道外压。配重层对管道的影响,在海底管道分析中以等效刚度和土弹簧约束的形式考虑在内。

### 1.4 海底管道穿越地震断层分析方法推荐做法

通过以上的总结分析,建议进行海底管道穿越断层反应分析,参考陆上管道分析方法,有解析法和有限元法2种。解析法推荐Newmark-Hall法和Kennedy法。有限元法可根据断层作用特点按管单元和壳单元2种单元模式进行分析。

在没有专门的海底管道抗震设计规范可参考的情况下,海底管道穿越地震断层分析目前推荐以ASCE—1984规范的设计方法为基础,综合考虑其他规范及文献研究成果进行建模分析。

## 2 失效准则

### 2.1 ASCE 失效判据

该规范主要基于应变准则,规定地震断层作用下管道响应应变失效准则见表2。

表2 应变失效准则表

应变类型	允许应变
由于内压、动静荷载以及非振 动性的荷载(断层、滑坡和 液化等)造成的应变	拉伸:2%~5%(适用于直管,对 于弯管需要考虑更多准则) 压缩:出现褶皱

考虑安全系数后,出现褶皱的应变按公式(1)计算:

$$[\varepsilon_c]_F = 0.3(\delta/D) \quad (1)$$

式中, $\delta$ 为管道壁厚; $D$ 为管道外直径。

### 2.2 海水外压对管道极限压缩应变折减

根据PRCI—2004<sup>[9]</sup>,海底管道承受海水带来的外压,海水外压会对管道极限压缩应变造成一定的折减,使管道允许压缩应变降低。考虑外压后的极限压缩应变按公式(2)计算:

$$\epsilon_{cr-p} = \epsilon_{cr}(g - P_{ext}/P_{cr}) \quad (2)$$

式中,  $\epsilon_{cr-p}$  为考虑外压后的极限压缩应变;  $\epsilon_{cr}$  为未考虑外压的极限压缩应变;  $g$  为初始椭圆度修正系数, 计算按公式 (3);  $P_{ext}$  为净外部压力 (外压-内压);  $P_{cr}$  为压溃压力, 计算按公式 (4)。

$$g = (1 + 20\delta)^{-1} \leq 1 \quad (3)$$

$$P_{cr} = (P_e \cdot P_y) / \sqrt{P_e^2 + P_y^2} \quad (4)$$

式中,  $\delta$  为管道的初始椭圆度, 随水深的增加而增加;  $P_e$  为泊松比为 0.3 时的弹性屈服压力, 计算按公式 (5);  $P_y$  为截面屈服压力, 计算按公式 (6)。

$$P_e = 2.2 \cdot E(t/D)^3 \quad (5)$$

$$P_y = (2 \cdot \sigma_y \cdot t) / D \quad (6)$$

不考虑内压, 只考虑海水外压, 针对依托工程的海底管道, 椭圆度为 1% 时压缩应变折减系数见图 1。

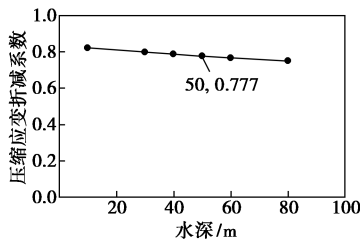


图 1 考虑海水外压的压缩应变折减系数

基于 X65 管线钢的材料特性, 得到适用于依托工程管道在断层作用下的允许失效准则, 见表 3。

表 3 依托工程海底管道允许应变汇总表

海底管道		断层作用	
规格	钢级	拉伸 [ $\epsilon_t$ ]	压缩 [ $\epsilon_c$ ]
$\Phi 813 \times 25.4$ mm	X65	2.5%	0.743%

### 3 有限元数值模型

应用 ANSYS 软件, 采用有限元方法进行海底管道穿越地震断层分析。断层作用下管道有限元建模采用 PIPE20 管单元模拟管道、COMBIN39 单元模拟土弹簧。PIPE20 单元是一种非线性单元, 有 2 个节点, 每个节点有 6 个自由度, 分别是 3 个转动和 3 个位移自由度, 除了有拉压、弯曲、扭转性能外, 还具有塑形、蠕变、膨胀特性。COMBIN39 也是一种非线性弹簧单元, 具有 2 个节点, 并通过一个力  $F$  (弯矩  $M$ )、一个位移  $D$  (转角  $\Phi$ ) 的曲线来定义非线性弹簧的受力性质。为达到分析精度的要求, 单元长度选取为 0.3 倍的管径。取 1 000 m 管道作为分析长度, 沿管轴方向单元长度取 0.2 m。

### 3.1 X65 管道本构模型

埋地管道的极限状态分析必须考虑管材的非线性特性。采用 Ramberg-Osgood 模型作为管线钢的本构模型, 非线性应力-应变关系如下:

$$\epsilon_x = (\sigma_x/E_0) \{1 + [n/(1+r)](\sigma_x/\sigma_y)^r\} \quad (7)$$

式中,  $\epsilon_x$  为管道应变;  $\sigma_x$  为管道的应力,  $E_0$  为管道初始弹性模量;  $\sigma_y$  为管道钢屈服应力;  $n$ 、 $r$  为 Ramberg-Osgood 模型的参数。

海底管道工程用 X65 普通管线钢的 Ramberg-Osgood 的本构模型见图 2。

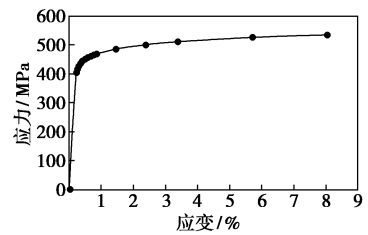


图 2 X65 管线钢本构关系图

### 3.2 管土相互作用模型

分析中用到的黏土、砂土和淤泥混砂 3 种土体的基本参数见表 4。依据 ALA—2001<sup>[8]</sup> 中推荐的理想弹塑性土弹簧模拟非线性管土相互作用, 埋深 2 m 下管径 813 mm 土弹簧参数见表 5。

表 4 土体基本参数

土体类型	内聚力/ Pa	上覆土	天然土	天然土	静止土	内摩 擦角/ (°)
		有效重度/ ( $N \cdot m^{-3}$ )	有效重度/ ( $N \cdot m^{-3}$ )	总重度/ ( $N \cdot m^{-3}$ )	压力系 数值	
黏土	30000	16700	16700	19700	0.5	20.0
砂土	0	16200	16200	17200	0.4	35.0
淤泥夹砂	10400	15400	15400	16400	0.6	3.9

表 5 管径 813 mm 土弹簧参数

土弹簧参数	砂土		黏土		淤泥夹砂	
	屈服力/ ( $N \cdot m^{-1}$ )	屈服位 移/m	屈服力/ ( $N \cdot m^{-1}$ )	屈服位 移/m	屈服力/ ( $N \cdot m^{-1}$ )	屈服位 移/m
轴向土弹簧	26364	0.0050	53695	0.0100	13658	0.0100
水平横向土弹簧	218367	0.1200	151869	0.1200	27176	0.1200
垂直隆起土弹簧	43555	0.0520	103657	0.1626	27040	0.1626
垂直支撑土弹簧	697136	0.0813	303650	0.1626	38236	0.1626

### 3.3 混凝土配重层对地震反应分析的影响

混凝土配重层会对管道刚度产生影响, 且在管道端部会有部分长度未被混凝土配重层包裹 (长度约为 380 mm)。此部分由于截面的变化、结构等效刚度的不同会造成管道的应力集中。可参考

DNV—RP—F105<sup>[13]</sup>规范中相关规定,对管道混凝土配重层刚度进行等效转换,见公式(8)和(9)。

$$CSF = k_c (EI_{conc} / EI_{steel})^{0.75} \quad (8)$$

$$E_{conc} = 10\,000 \cdot f_{cn}^{0.3} \quad (9)$$

式中,CSF为混凝土刚度增强因子; $k_c$ 为经验系数,防腐层为沥青时取0.33,为PP/PE时取0.25; $EI$ 为抗弯刚度; $f_{cn}$ 为混凝土强度。公式(9)中 $f_{cn}$ 和 $E_{conc}$ 单位均为MPa。

针对依托工程 $\Phi 813 \times 25.4$  mm海底管道,不同配重层厚度得到的应力集中系数(SCF)和应变集中系数(SNCF)如图3。

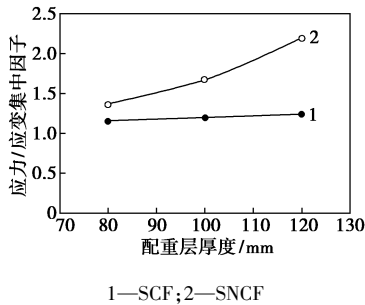


图3  $\Phi 813 \times 25.4$  mm管道混凝土配重层厚度的应力/应变集中系数

从图3可以看出,由于混凝土配重层的存在使管道在受到断层作用时应力和应变均有不同程度的增加,配重层厚度越厚集中系数SCF和SNCF越大。弹性阶段二者比较接近,进入塑性阶段后,应变增大的趋势大于应力增加的趋势,即相同混凝土配重层厚度时应变集中系数SNCF要大于应力集中系数SCF。配重层对应变的影响大于对应力的影响。

## 4 断层作用下管道响应分析与设计优化

### 4.1 管道正常运行状态

计算管道正常运行状态(温度、内压和重力三者组合作用)时的反应见图4。从图4可以看出,管道应力此时产生了叠加效应,轴向应力最大值为 $-221$  MPa,应变为 $-7.76 \times 10^{-4}$ ,管道处于安全状态。

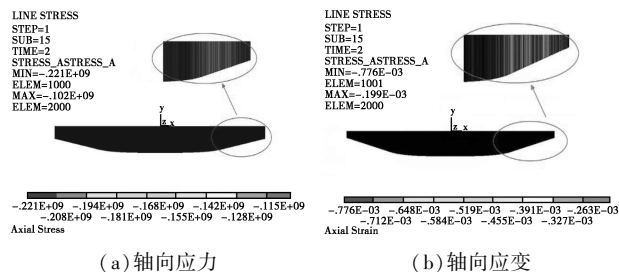


图4 温度、内压和重力三者组合作用对管道的影响

### 4.2 管道穿越断层夹角优化研究

根据断层数据,就管道穿越角度问题进行设计方案的优化设计,以获得最优方案。

正断层计算工况参数:位错量为2.94 m,埋深为2 m,断层倾角取 $50^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $70^\circ$ ,管道穿越角变动;土质为淤泥夹砂;考虑管道正常运行状态温度、内压和重力的影响。见图5。

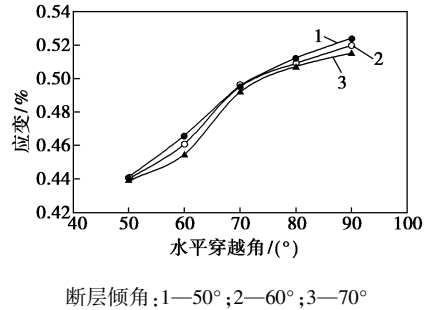


图5 正断层管道穿越角角度优化

由图5可知,正断层情况下,管道应变随着管道穿越断层的角度增大而增大,但穿越角越小管道横向变形增大,故穿越角也不宜太小,以免产生较大的横向变形。由于断层的不确定性,水平面内管道穿越角以 $45^\circ \sim 60^\circ$ 为宜,建议按 $50^\circ$ 选取。

而同样的穿越角情况下,断层倾角越小其反应越大,在断层倾角无法改变的情况下,此时可以通过调整管道在竖直面内走向,使管道走向尽可能与断层垂直,这样有利于管道抵抗断层作用。

### 4.3 回填土种类优化研究

关于回填土的优化选择,从土壤的性质和埋深2方面开展研究。首先进行的是回填土种类的相应研究。

正断层计算工况参数:位错量为2.94 m,埋深为2 m,断层倾角取 $50^\circ$ ,管道穿越角为 $90^\circ$ ;选取砂土、碎石土、淤泥夹砂3种对管道约束较小的土体为例,考虑管道正常运行状态温度、内压和重力的影响。见图6。

从图6可以看出,淤泥夹砂作为回填土时,管道

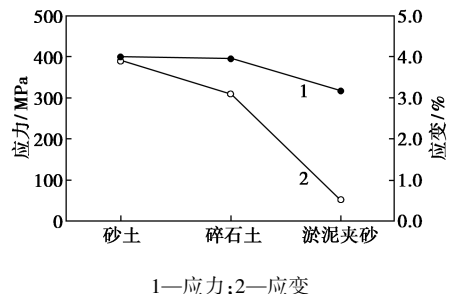


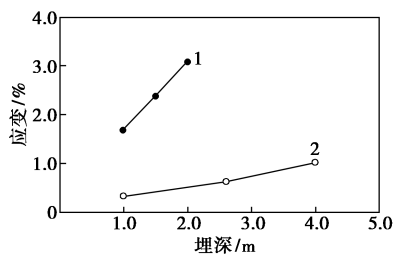
图6 正断层回填土优化选择

在地震断层作用下反应最小。所以在回填土壤优化选择上,从经济角度来看,可以直接选择原天然土作为回填土,完全可以满足安全需求。

#### 4.4 回填土深度优化研究

埋深工况计算参数:在断层位错量为 2.94 m,正断层倾角为  $50^\circ$ ,管道穿越角为  $90^\circ$ ,以碎石土和淤泥夹砂 2 种土质为例,考虑管道正常运行状态温度、内压和重力的影响。

图 7 是埋深对管道影响的计算结果。从中可以看出埋深对于管道的影响与土壤种类有关,通常情况下浅埋有利于管道抵抗断层,同时,计算结果再一次表明回填土采用淤泥夹砂时管道反应最小。



1—碎石土;2—淤泥夹砂

图 7 埋深优化分析

#### 4.5 管道壁厚的选择

壁厚工况计算参数:断层位错量为 2.94 m,埋深 2 m,正断层,断层倾角为  $50^\circ$ ,管道穿越角为  $90^\circ$ ,土层为淤泥夹砂。考虑管道正常运行状态温度、内压和重力的影响。见图 8。

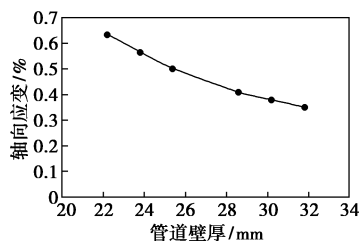


图 8 壁厚对地震断层作用的影响

从图 8 可以看出,在淤泥夹砂作为回填土的情况下,管道轴向应变均未超过允许应变,管道安全。在其他条件一致的情况下增加管道壁厚可以减弱断层对管道的影响。所以在条件允许的情况下可以适当增大管道壁厚,这样有利于管道抵抗断层错动作用。见图 8。

## 5 结论

分析探讨了海底管道穿越地震断层分析方法,依托国内某海底天然气管道进行了断层作用下管道

响应分析研究,形成以下主要结论:

(1)海底管道穿越断层反应分析参考陆上管道抗震设计规范,有解析法和有限元法 2 种,解析法推荐采用 Newmark-Hall 法和 Kennedy 法,有限元法可根据断层作用特点按管单元和壳单元 2 种单元模式进行分析。

(2)与陆上管道不同,海底管道穿越地震断层分析需考虑海水外压对管道极限压缩应变的影响,可通过对管道允许压缩应变进行相应折减;同时,需考虑配重层对管道的影响,在海底管道分析中以等效刚度和土弹簧约束的形式考虑在内。

(3)正断层作用下,考虑断层的不确定性,水平面内管道穿越角以  $45^\circ \sim 60^\circ$  为宜。回填土壤优化选择上,从经济角度来看,宜选择海床表层强度低的原天然土作为回填土。管道浅埋或在条件允许的情况下可以适当增大管道壁厚,有利于管道抵抗断层错动作用。

## 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; 416-425.
- [2] Kennedy R P, Chow A W, Williamson R A. Fault movement effects on buried oil pipeline [J]. Transportation Engineering Journal, 1977; 617-633.
- [3] Wang R L, Yeh Y H. A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1985, 13: 75-96.
- [4] 刘爱文, 胡聿贤, 赵凤新, 等. 地震断层作用下埋地管线壳有限元分析的等效边界方法 [J]. 地震学报, 2004, (S1): 141-147.
- [5] 国家发展和改革委员会. SY/T 0450—2004. 输油(气)钢质管道抗震设计规范 [S].
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50470—2008. 油气输送管道线路工程抗震技术规范 [S].
- [7] 中华人民共和国建设部. GB 50032—2003. 室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范 [S].
- [8] American Lifelines Alliance. Guidelines for the design of buried steel pipe [S]. 2001.
- [9] PRCI. Guidelines for the seismic design and assessment of natural gas and liquid hydrocarbon pipelines [S]. 2004.
- [10] ASCE. Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline system [S]. 1984.
- [11] Japan Society of Civil Engineers. Earthquake resistant design codes in Japan [S]. 2000.
- [12] 张小玲. 地震作用下海底管线及周围海床动力响应分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [13] DNV. DNV—RP—F105. Free spanning pipelines [S]. 2006. ■