

文章编号:1007-2284(2021)05-0145-07

# 基于有限元模拟的跨断层输水管道失效风险评价 ——以阿红干渠管道为例

顾世祥<sup>1</sup>,梅伟<sup>1</sup>,唐畅<sup>2</sup>,杨帆<sup>1</sup>,霍玉国<sup>1</sup>,曹子君<sup>2</sup>(1. 云南省水利水电勘测设计研究院,昆明 650021; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室  
工程风险与防灾研究所,武汉 430072)

**摘要:**对于涉及多地震带的大型管道工程而言,准确评价典型场地的管道安全性十分重要,比如穿越断层的埋地输水管道不可避免地受到断层错动的不利影响。以滇中引水二期工程玉溪段阿红干渠管道五段为例研究了活动断层作用下管道的失效风险。采用ABAQUS内置管-土相互作用(PSI)单元建立由地震位移控制的有限元模型,考虑地震位移荷载、管材强度和土体不排水剪切强度的不确定性,以轴向最大拉应变和压应变作为响应值,获得了管道响应的分布,基于蒙特卡洛模拟方法计算了给定工况下管道的失效概率。在此基础上,研究了地震震级、管壁厚度和填土深度对于所选管道失效概率的影响规律。结果表明:跨断层埋地管道的安全性对于地震发生震级十分敏感,增加管壁厚度可以降低管道的失效概率,埋深对于管道的安全性的影响较小。

**关键词:**断层错动;管道;失效概率;有限元模拟;逆断层

**中图分类号:**TV672+.2 **文献标识码:**A

顾世祥,梅伟,唐畅,等.基于有限元模拟的跨断层输水管道失效风险评价:以阿红干渠管道为例[J].中国农村水利水电,2021(5):145-151.

GU S X, MEI W, TANG C, et al. Risk assessment of cross-fault water pipeline based on finite element simulation: a case study of Ahong main canal[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(5): 145-151.

## Risk Assessment of Cross-fault Water Pipeline Based on Finite Element Simulation: A Case Study of Ahong Main Canal

GU Shi-xiang<sup>1</sup>, MEI Wei<sup>1</sup>, TANG Chang<sup>2</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>, HUO Yu-guo<sup>1</sup>, CAO Zi-jun<sup>2</sup>

(1. Yunnan Institute of Water and Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, Yunnan Province, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Institute of Engineering Risk and Disaster Prevention, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

**Abstract:** For large pipeline projects involving multiple seismic zones, it is very important to accurately assess the pipeline safety of typical sites. For example, buried water pipelines crossing faults are inevitably adversely affected by fault displacement. This paper takes the fifth section of the Ahong main canal pipeline in Yuxi area of the second stage diversion project in central Yunnan as an example to study the failure risk of pipeline under the action of active faults. The built-in pipe-soil interaction (PSI) element of ABAQUS software is used to establish a finite element model controlled by seismic displacement, taking into account the uncertainty of seismic displacement load, pipe strength and undrained shear strength of soil, and the maximum axial tensile strain and compressive strain are used as the response values to obtain the distribution of pipeline response. Based on the Monte Carlo simulation method, the failure probability of the pipeline under a given working condition is calculated. Then, this paper studies the influence of earthquake magnitude, pipe wall thickness and filling depth on the failure probability of the selected pipeline. Results show that the safety of buried pipelines across faults is very sensitive to the magnitude of

收稿日期:2020-06-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51679174);湖北省自然科学基金面上项目(2018CFB499)。

作者简介:顾世祥(1972-),男,教授级高级工程师,主要从事水利

水电工程规划设计研究方向。E-mail:gushixiang@qq.com。

通讯作者:曹子君(1987-),男,教授,主要从事水工岩土工程可靠性与风险研究。E-mail:zijuncao@whu.edu.cn。

an earthquake. Increasing the thickness of the pipe wall can reduce the probability of failure of the pipe while the depth of the buried pipe has little effect on the safety of the pipeline.

**Key words:** fault displacement; pipeline; failure probability; finite element simulation; reverse fault

## 0 引言

滇中引水工程跨越金沙江、澜沧江、红河、南盘江四大水系,穿越横断山系高中山地貌区及滇中、滇东盆地山原区,沿线涉及多条地震带。活动断裂带突发地震带来的断层错动会导致埋地管道受力发生“S”型变形,管道可能因发生局部拉伸破坏或压缩破坏而失效,不利于整个输水管道工程的安全运行,甚至会带来严重的次生灾害<sup>[1]</sup>。研究典型跨断层埋地管道响应能够为保障活动断裂带输水管道安全提供参考依据,对输水管道工程防震减灾具有十分重要的意义。

跨断层埋地管道分析方法包括理论解析法和数值模拟法。解析方法通常以索模型或梁模型为基础进行研究,该方法难以分析管道受压和管截面大变形的情况<sup>[2]</sup>。数值模拟方法是研究埋地管道地震响应的重要手段,管-土相互作用建模方式是数值模拟方法中的重要环节,主要包括两种方法:土弹簧法和接触面法。Vazouras等<sup>[3,4]</sup>采用非线性接触面,用壳单元和实体单元分别模拟管道和土体,对管道在走滑断层作用下进行了精细化数值模拟。目前,国内外埋地管道抗震设计指南(例如GB/T50470-2017<sup>[5]</sup>;ALA,2005<sup>[6]</sup>;PRCI,2004<sup>[7]</sup>)推荐采用土弹簧法进行跨断层埋地管道响应分析。土弹簧法相比于接触面法具有计算时间短、收敛性好及应用广泛的特点<sup>[8]</sup>。ABAQUS软件中基于土弹簧法开发的PSI接触单元能够合理地表征管-土相互作用的非线性行为,在埋地管道和周围土体的相互作用分析中广泛应用<sup>[9-11]</sup>。

实际工程中,断层错动引起的管道响应受到多种不确定性因素的影响<sup>[12]</sup>,比如管材力学参数的不确定性、土体参数的不确定性以及荷载不确定性等。基于蒙特卡洛的随机模拟方法能够合理地考虑上述不确定性对管道结构响应的影响。例如,樊恒等<sup>[13]</sup>研究了考虑地震水平加速度、管壁厚度、屈服强度、弹性模量和泊松比的不确定性对管道动力响应的影响。陶凯尔等<sup>[14]</sup>采用解析法分析跨断层埋地管道响应时考虑了地震烈度和管壁厚度的不确定性,采用数值模拟分析跨断层埋地管道响应时仅考虑了断层错动位移的不确定性。目前,国内外学者对跨断层埋地管道的不确定性分析研究相对较少,且一般根据跨断层埋地管道解析法进行分析,主要考虑管材参数和荷载的不确定性,没有考虑场地土体参数的不确定性,研究算例常为走滑断层。

本文以滇中引水二期工程玉溪段阿红干渠管道五段为例,研究了活动断层作用下管道的失效风险。利用ABAQUS软件中的PSI单元模拟管-土相互作用的非线性行为,通过等效样本法<sup>[15]</sup>获得场地的土体力学参数样本值,考虑了地震位移荷载、管道材料强度以及土体不排水剪切强度的不确定性对管道动力响应的影响,运用蒙特卡洛模拟方法进行随机模拟分析,得到所研究管道的失效概率用以评估管道的安全性和可靠性。

在此基础上,研究了地震震级、管壁厚度和填土深度对于管道失效概率的影响规律,为该工程及类似工程提供参考依据。

## 1 场地概况

滇中引水工程二期工程玉溪段输水管道布设不可避免地穿越地震活动带,管道抗震问题突出。断层活动引起的永久地面变形的发生场地相对固定,管道损坏率高,管道抗剪断问题成为管道工程中的重要问题之一。如图1所示,玉溪段阿红干渠管道同时跨越普渡河断裂带和曲江断裂带,其中阿红干渠管道五段跨越普渡河断裂带。

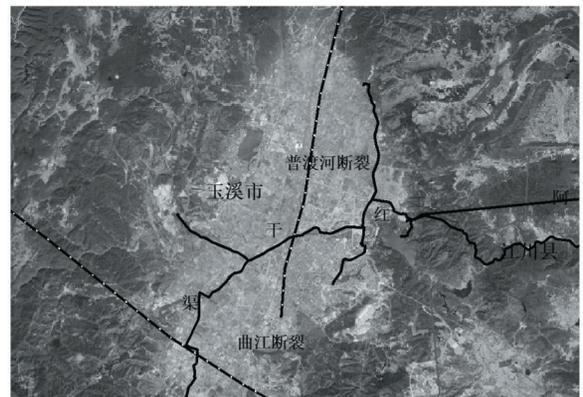


图1 玉溪地区阿红干渠与断层相对位置图

Fig. 1 Relative locations of Ahong canal and fault in Yuxi area

普渡河断裂带是滇中“南北向构造带”的主要成分之一。总体走向近南北向,倾向向东,倾角约 $75^{\circ}\sim 80^{\circ}$ <sup>[16]</sup>,区域长度大于100 km,断裂性质为逆断层,左倾滑。其主干断裂大致沿普渡河延伸,总体走向近南北,全长约300 km。研究表明,普渡河断裂第四纪以来的平均水平运动速率为 $0.9\sim 2.0$  mm/a,平均垂直运动速率为 $0.35\sim 0.47$  mm/a<sup>[17]</sup>。该断裂强烈活动的最新时代为早中更新世时期,晚更新世以来,该断裂带仍有活动,但活动性明显减弱。普渡河断裂带自公元1600年记录以来,5级以上地震17次,包括1985年4月18日在云南禄劝-寻甸交界地区发生的 $M_s 6.3$ 级地震。

根据玉溪盆地钻孔探测成果图<sup>[18]</sup>,土层深度5.5 m以上为黏土层,土层深度5.5~13.3 m为粉质黏土。根据阿红干渠地质资料,黏土层的内摩擦角为 $12^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。阿红干渠管道五段与普渡河断裂带相交,夹角约为 $45^{\circ}$ ,该管段分配水头15.298 m,设计流量为 $5.9$  m<sup>3</sup>/s,设计管径1.8 m,距离管轴的填土埋深为3.2 m,输水管道拟采用Q235C钢材。

## 2 确定性分析模型

### 2.1 位移分量

在研究跨断层埋地管道响应时,通常将其近似简化为以位移荷载控制的静力问题来分析,因此合理地估计断层位移,对

研究特定场地处管道响应具有重要作用。本文仅考虑普渡河断裂带为逆断层的情况,根据地震震级,采用逆断层地震位移估算经验公式<sup>[19]</sup>,可以得出断层位移估计值。

$$\lg(MD) = -1.84 + 0.29 M [\sigma_{\lg(MD)} = 0.42] \quad (1)$$

$$\lg(AD) = -0.74 + 0.08 M [\sigma_{\lg(AD)} = 0.38] \quad (2)$$

式中: $M$ 为地震震级; $MD$ 为最大地表断层位移,m; $AD$ 为平均地表断层位移,m; $\sigma_{\lg(MD)}$ 和 $\sigma_{\lg(AD)}$ 分别为两个回归方程的标准差。

需要注意的是,公式(1)和(2)仅适用于平行于断层走向的竖直平面上的位移,此外其只适用于 $M$ 为5.4~7.4的情况。在本文有限元模拟中,仅考虑断层最大位移 $MD$ 的工况,即:

$$D_{FS} = MD \quad (3)$$

式中: $D_{FS}$ 为平行于断层走向的竖直平面上的断层位移,m。

根据位移与夹角的几何关系,可由平行于断层走向竖直平面上的断层位移推得断层的总位移<sup>[7]</sup>:

$$\Delta = \frac{D_{FS}}{\sqrt{\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \cos^2 \beta}} \quad (4)$$

式中: $\Delta$ 为断层总位移; $\alpha$ 为断层倾角; $\beta$ 为断层走向与区域应力方位角之间的水平夹角(对于以逆断层为主的断层 $\beta=90^\circ$ )。

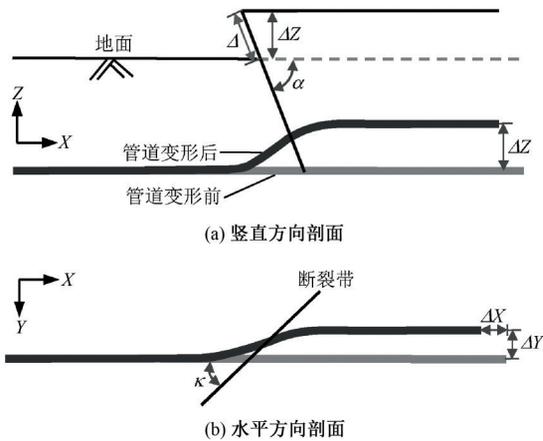


图2 逆断层位移分量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reverse fault displacement components

图2为典型逆断层位移分量示意图。如图2(a)表示逆断层总位移与竖直方向位移的关系,图2(b)为水平面上平行于管轴方向位移与垂直于管轴方向位移的关系。已知逆断层倾角、断层与管道的夹角,可将断层总位移分解为三个相互垂直方向的位移<sup>[7, 20]</sup>:

$$\Delta X = \Delta \cdot \cos \alpha \sin \kappa \quad (5)$$

$$\Delta Y = \Delta \cdot \cos \alpha \cos \kappa \quad (6)$$

$$\Delta Z = \Delta \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

式中: $\kappa$ 为管道与断层之间的夹角; $\Delta X$ 为平行于管道轴线方向的位移分量; $\Delta Y$ 为水平面上垂直于管道轴向方向的位移分量; $\Delta Z$ 为竖直方向的位移分量。

## 2.2 管-土相互作用

管-土相互作用是影响埋地管道响应的关键因素之一。土弹簧法以弹性地基梁假设为基础,将土体对管道的作用简化为3个方向上的土弹簧,通过土弹簧的特性曲线(图3)来表征管-土相互作用的本构关系<sup>[21, 22]</sup>。

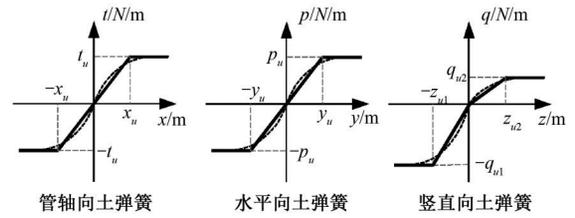


图3 管-土相互作用中的理想弹塑性土弹簧

Fig. 3 Ideal elastoplastic soil springs in pipe-soil interaction

管-土相互作用的本构关系可以通过室内试验获得,也可以采用文献中的简化模型,其中美国ASCE生命线工程技术规程中提出的管-土相互作用模型被广泛应用。本文中管道所埋地层为黏土层,表征土弹簧特性的特征值可计算如下<sup>[23]</sup>。

$$\begin{cases} t_u = \pi D \alpha S_u \\ x_u = 5.08 \sim 10.16 \text{ mm (硬黏土 - 软黏土)} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} p_u = S_u N_{ch} D \\ y_u = 0.03 \sim 0.05 (H + D/2) \text{ (硬黏土 - 软黏土)} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} q_{u1} = S_u N_c D \\ z_{u1} = 0.15 D \text{ (黏土)} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} q_{u2} = S_u N_{cu} D \\ z_{u2} = 0.1H \sim 0.2H \text{ (硬黏土 - 软黏土)} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $D$ 为管道外径; $S_u$ 为土体不排水剪切强度; $H$ 为距离管道轴线的土体深度; $\alpha$ 为与 $S_u$ 有关的系数; $N_{ch}$ 和 $N_{cu}$ 为与 $H/D$ 有关的系数; $N_c$ 为与土体内摩擦角 $\varphi$ 有关的系数; $t_u$ 为管轴方向单位长度土体对管道的最大抗力; $x_u$ 为 $y_u$ 对应的最小轴向位移; $p_u$ 为水平方向单位长度土体对管道的最大抗力; $y_u$ 为 $p_u$ 对应的最小水平方向位移; $q_{u1}$ 和 $q_{u2}$ 分别为竖直向下和竖直向上方向单位长度土体对管道的最大抗力; $z_{u1}$ 为 $q_{u1}$ 对应的最小竖向位移; $z_{u2}$ 为 $q_{u2}$ 对应的最小竖向位移。

因此,当已知 $S_u$ 、 $\varphi$ 、 $H$ 和 $D$ 时,即可获得土弹簧特性曲线。ABAQUS中内置的PSI单元基于土弹簧模型表征管-土相互作用。当采用PSI单元模拟埋地管道和土体的相互作用时,可采用梁单元、管单元或弯接头单元来模拟管道,PSI的一侧与管道共节点,另一侧代表土体表面,并用于施加边界条件,以描述地面的运动<sup>[9, 10]</sup>。

## 2.3 建模过程

玉溪段阿红干渠管道五段管道壁厚为12 mm,外径为1.824 m,埋深 $H$ 为3.2 m, $\varphi$ 取 $14^\circ$ ,初设土体不排水剪切强度 $S_u$ 为66 kPa。可估算由水压引起的管道轴向应力<sup>[24]</sup>:

$$\sigma_n = \frac{pD}{4\delta} \quad (12)$$

式中: $p$ 为管道内部水压; $\delta$ 为管壁厚度; $\sigma_n$ 为由内部水压引起的管道轴向拉应力。

初步计算可得 $\sigma_n=5.7$  MPa,该值远远小于管材的屈服强度(235 MPa)。因此,建模时可忽略内部水压的影响。采用简化的折线弹塑性模型表征管材特性,图4所示为Q235C钢材的理想应力-应变曲线,钢材的屈服强度为235 MPa,弹性模量为206 GPa,泊松比为0.3,拉伸强度为395 MPa。本文所建立的三维模型如图5所示,选取管道长度600 m,右侧为断层上盘,断层错动时,右盘上移。建立模型时,管道、地面和管-土相互作用

分别采用PIPE31单元、RB3D2单元和PSI34单元进行模拟,靠近断层的位置管单元网格划分较密,远离断层的位置管单元网格划分的较稀疏,以便获得良好的精度和计算效率。根据2.1节计算得到地震震级为6.3时的位移荷载分量,如表1所示。

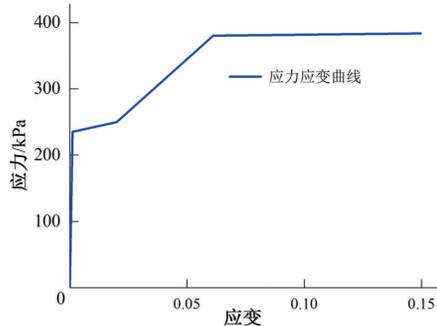


图4 Q235C钢材简化应力应变曲线

Fig.4 Simplified stress-strain curve of Q235C

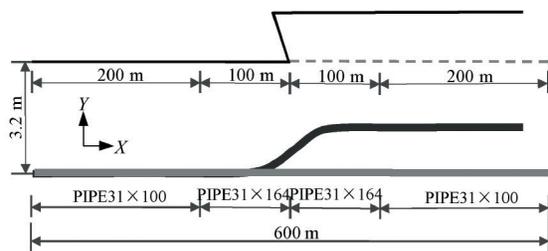


图5 模型尺寸示意图

Fig.5 Schematic diagram of model size

表1 地震工况下的位移分量(M=6.3)

Tab.1 Displacement components under earthquake of  $M = 6.3$

方向	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
位移/m	-0.184	-0.184	0.971

## 2.4 失效准则

基于应变的失效准则相比应力失效准则更能够发挥材料的塑性和延展性能,本文基于应变设计方法对通过活动断层的埋地管道进行抗拉伸和抗压缩验算。管道轴向容许拉伸应变和管道轴向容许压缩应变应分别按式(13)和式(14)计算<sup>[5]</sup>:

$$[\varepsilon_t]_F = \varphi_{st} \varepsilon_t^{crit} \quad (13)$$

$$[\varepsilon_c]_F = \varphi_{sc} \varepsilon_c^{crit} \quad (14)$$

式中:  $[\varepsilon_t]_F$  和  $[\varepsilon_c]_F$  分别为埋地管道抗断的轴向容许拉伸应变和容许压缩应变;  $\varepsilon_t^{crit}$  和  $\varepsilon_c^{crit}$  分别为管段的极限拉伸应变和压缩应变;  $\varphi_{st}$  为拉伸应变承载系数,当环向应力小于屈服强度的40%时,取0.9;  $\varphi_{sc}$  为压缩应变承载系数,取0.6。本文中由GB/T50470-2017<sup>[5]</sup>附录D估算Q235C设计容许拉伸应变取值为0.91%,设计容许压缩应变取值为0.55%。

## 2.5 确定性结果分析

管道跟随土体发生3个方向的位移错动,但以竖直方向的位移为主,右侧管道向上运动时,管道上部受拉,下侧受压,由于逆断层在水平方向的位移分量使得管道轴向受压,因此该管道可能发生局部严重受压。管道轴向应力云图如图6所示,断层错动发生后,管道发生“S型”形变,且大部分区域发生轴向压

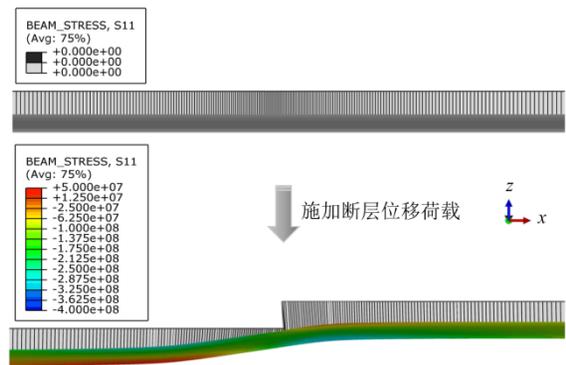


图6 管道轴向应力云图(M=6.3)

Fig.6 Axial stress cloud map of pipeline ( $M = 6.3$ )

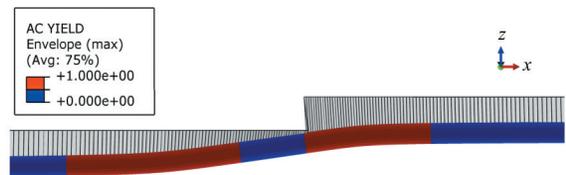


图7 管道弹塑性分区图(M=6.3)

Fig.7 Partition map of pipeline elastoplastic ( $M = 6.3$ )

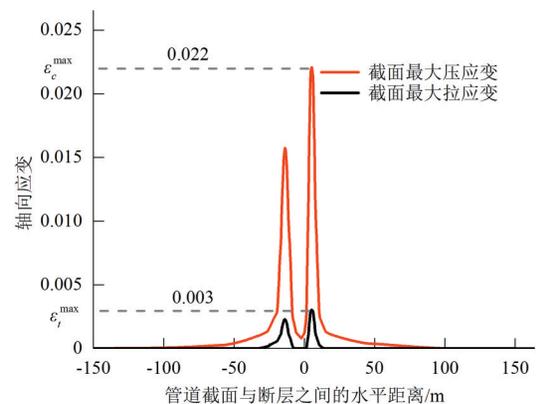


图8 管道轴向应变包络图

Fig.8 Axial strain envelope of pipeline

缩应变。图7中红色区域表示管道发生了塑性变形,可见位于断层附近的管道大部分区域已进入塑性阶段。图8为管道轴向应变包络图。如图所示管道最大拉应变  $\varepsilon_t^{\max}$  为0.3%,小于  $[\varepsilon_t]_F$ ,管道最大压应变  $\varepsilon_c^{\max}$  为2.2%,大于  $[\varepsilon_c]_F$ ,管道因而压缩失效。

## 3 不确定性分析

### 3.1 随机变量

跨断层埋地管道响应受到多种不确定性因素的影响。本文中考虑了管材力学参数、位移荷载以及土体参数的不确定性对管道响应的影响。钢材由于其锻造过程中存在缺陷或者不均匀性等因素使得材料强度具有不确定性,已知Q235C钢材屈服强度235 MPa。本文中假设钢材屈服强度服从对数正态分布,其均值为235 MPa,变异系数为10%,即标准差为23.5 MPa,其他强度参数(如极限抗拉强度与屈服强度的比值)保持不变。地震震级与最大地表断层位移之间并非满足映射关系,其关系往往由统计分析得到。因此,利用经验公式(1)计算最大地表断层位移时具有不确定性,其中  $\log(MD)$  服从均值为  $(-1.84+$

0.29M), 标准差为0.42的正态分布。

岩土工程勘探数据通常十分有限,以至于无法直接根据这些勘探数据获得有效的土体参数统计特征和概率分布。基于贝叶斯理论的等效样本法<sup>[15]</sup>能够将场地有限的勘探数据和先验信息结合,得到所需岩土体参数的后验分布,并采用马尔科夫蒙特卡罗模拟方法获得后验分布的大量等效样本。

本文采用玉溪盆地地区黏土层的剪切波速数据<sup>[18]</sup>计算管道所埋地层的不排水剪切强度。不排水剪切强度 $S_u$ 与剪切波速 $V_s$ 具有以下经验关系<sup>[25]</sup>:

$$S_u = 0.152V_s^{1.142} \quad (\sigma_s = 8.84) \quad (15)$$

式中: $\sigma_s$ 为上述回归方程中不排水剪切强度 $S_u$ 的标准差。等效样本法已经内置于BEST软件<sup>[15]</sup>,本文采用BEST软件基于5个不同深度处剪切波速 $V_s$ 数据获得该土层30 000个不排水剪切强度 $S_u$ 的等效样本,样本均值为66 kPa,标准差为14.5 kPa。由于BEST采用马尔科夫链蒙特卡罗模拟产生等效样本,不同样本间存在一定相关性。为了降低样本相关性的影响,本文从30 000个样本中等间距选取1 000个样本进行管道响应分析。

在对跨断层埋地管道响应分析进行随机模拟时,根据屈服强度和最大地表断层位移的概率分布生成1 000组随机样本,这些样本与 $S_u$ 的1 000个等效样本共同作为管道分析的输入参数,进行1 000次管道响应确定性分析,统计管道响应分析结果。

### 3.2 模型对比

由于材料非线性、大变形和管-土非线性接触等问题,基于有限元的随机模拟中不可避免地存在不收敛的情况。为避免或减少不收敛的情况出现,本文在随机模拟中进行了模型简化,由于本算例中基于轴向应变失效准则判断管道是否失效,轴向应变主要与轴向拉压和管道弯曲有关。如图2所示,轴向位移 $\Delta X$ 会直接引起管道轴向拉压变形,剪切位移 $\Delta Y$ 和 $\Delta Z$ 会引起管道弯曲和轴向拉伸。管道在剪切作用下,弯曲变形使得管道两侧分别承受大小相等的拉压应变,轴向拉伸增大了受拉一侧的拉应变,而削弱了受压一侧的压应变。因此,代表剪切作用的 $\Delta Y$ 和 $\Delta Z$ 对拉应变的影响较大,而对压应变的影响较小。

由公式(5)~(7)计算可得,轴向位移 $\Delta X$ 和水平向位移 $\Delta Y$ 相等,且断层错动引起的竖直方向位移 $\Delta Z$ 为轴向位移 $\Delta X$ 的5.3倍。因此,随机模拟中仅考虑施加轴向和竖直方向的位移荷载以简化模型,即将其简化为 $X$ - $Z$ 平面上的二维等效模型。在此,仅施加 $\Delta X$ 和 $\Delta Z$ 两个方向荷载的模型简称“2D”模型,而施加3个方向荷载的模型简称“3D”模型。

设管材屈服强度为235 MPa,管道壁厚为12 mm,外径为1.824 m,埋深 $H$ 为3.2 m, $\varphi$ 取 $14^\circ$ , $S_u=66$  kPa。仅改变地震震级进行2D和3D模型的确定性分析结果对比。图9(a)和(b)所示分别为不同地震震级作用下两种模型所计算的管道最大拉应变和最大压应变。由图9可知,两种模型计算所得管道最大拉应变和最大压应变十分接近,说明了2D模型的合理性。因此,在随机模拟中采用2D模型替代3D模型是可行的。

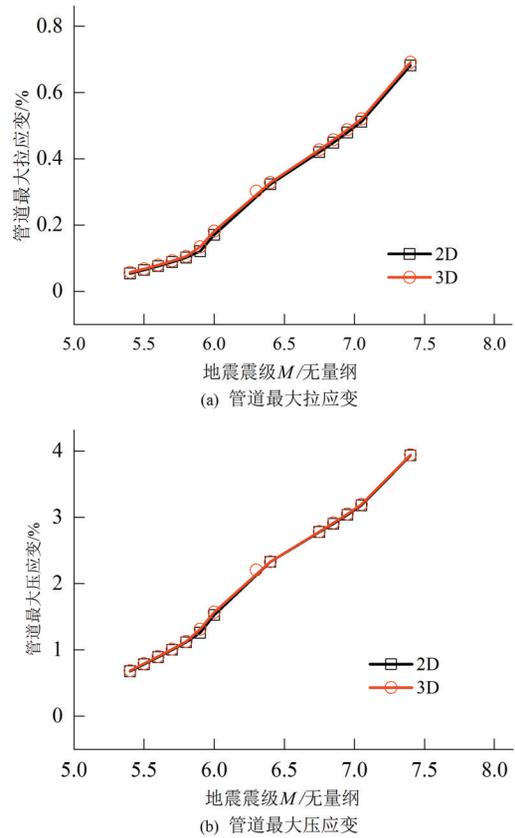


图9 2D和3D模型结果对比

Fig.9 Comparison of results from 2D and 3D models

### 3.3 结果分析

图10(a)所示为根据1 000组随机样本所得的管道最大拉伸应变分布图,其中横轴表示管道最大拉伸应变值,左侧纵轴为每一个直方区间对应的样本频率值,右侧纵轴表示样本累积频率。采用2.4节的应变失效准则判别,可得地震震级 $M$ 为6.3时,共有744个失效样本。图10中随机样本的轴向最大拉应变约有90%落在了0到 $[\epsilon_t]_f$ 之间,随机样本的轴向最大压应变有26.6%落在0到 $[\epsilon_c]_f$ 之间,即所有失效样本均因局部受压失效,且其中有10%的样本既发生拉伸失效又发生压缩失效。此外,在本文算例中,随机变量均值的响应(见2.5节中的确定性分析)约为随机模拟中响应的中位数。当发生6.3级地震时,该管道的失效概率为74.4%,其主要是由于压缩应变较大引起,即发生压缩破坏。这与确定性分析时的结果基本一致。在这种情况下,该管道不安全。

### 3.4 敏感性分析

除了考虑管道响应分析中的各种不确定因素之外,本节探讨地震震级、管壁厚度以及管道埋深对管道动力响应的影响。如图11所示,当管壁厚度为12 mm,埋深 $H$ 为3.2 m时,随着地震震级 $M$ 的增大,管道的失效概率也急剧增大,管道的动力响应对于地震震级十分敏感。

本文研究了地震震级 $M$ 为6.3,埋深 $H$ 为3.2 m,管壁厚度从10 mm到20 mm对管道动力响应的影响。如图12所示,随着管壁厚度的增加,管道失效概率呈下降趋势,在所选管道壁厚范围内管道的可靠性对于管道壁厚较敏感。

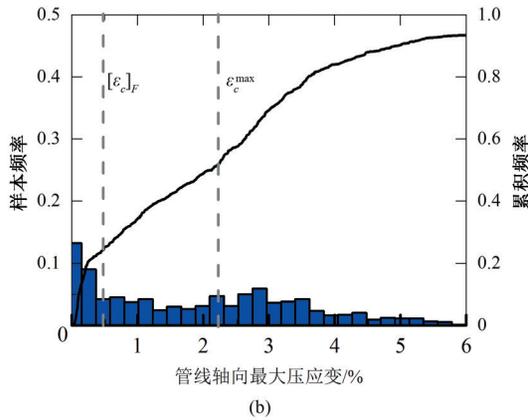
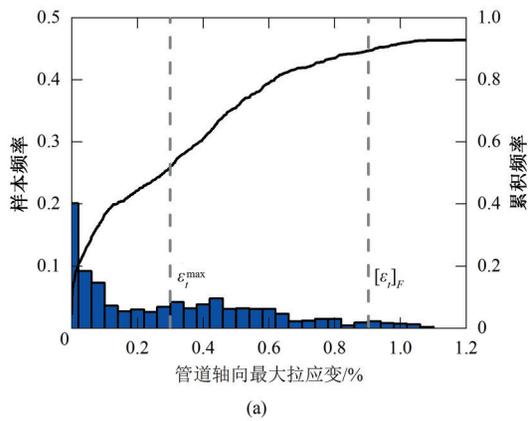


图10 随机模拟结果 ( $M=6.3$ )

Fig. 10 Results of stochastic simulation ( $M = 6.3$ )

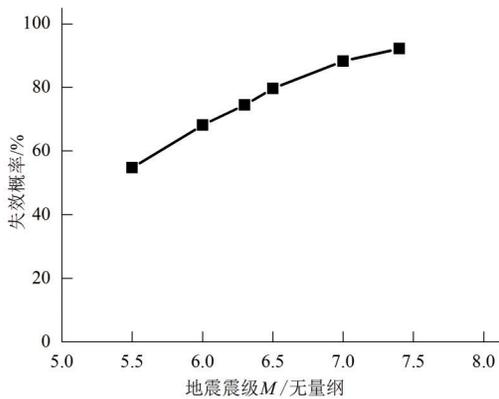


图11 地震震级对管道失效概率的影响

Fig.11 Influence of earthquake magnitude on pipeline failure probability

此外,本文研究了地震震级  $M$  为 6.3 时,管道填土深度从 1 m 到 5 m 变化对管道动力响应的影响。如图 13 所示,随着管道埋深的增加,未发现显著的变化趋势,与相关文献<sup>[26-28]</sup>结论基本一致。由此可见,所研究的管道的安全性能对于管道埋深不敏感。

#### 4 结果与讨论

本文以滇中引水二期工程玉溪段管道五段为例,研究了跨断层埋地管道的安全性和可靠性问题。采用 ABAQUS 内置管-土相互作用单元 (PSI) 建立了由地震位移控制的有限元模型,

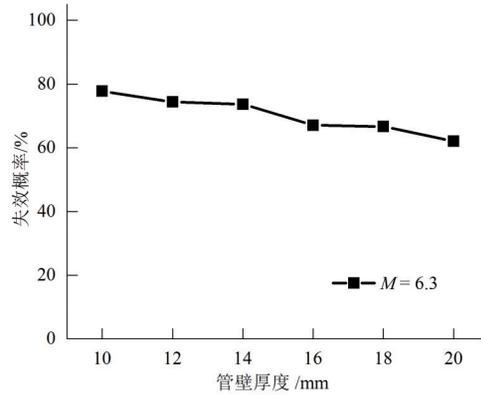


图12 管壁厚度对管道失效概率的影响

Fig.12 Influence of wall thickness on pipeline failure probability

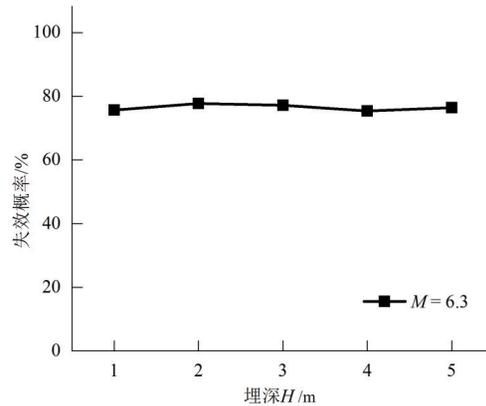


图13 管道埋深对管道失效概率的影响

Fig.13 Influence of pipeline depth on pipeline failure probability

开展了地震作用下施加永久位移荷载时管道的响应分析。考虑了地震位移荷载、管材强度和土体不排水剪切强度的不确定性,分析了管道动力响应(轴向应变)的分布,基于蒙特卡洛模拟计算了特定工况下管道的失效概率。此外,本文探讨了地震震级、管壁厚度和填土深度对于所研究管道的失效概率的影响规律。主要结论如下。

(1)在本文算例中,忽略水平向位移  $\Delta Y$  (即将三维模型简化为二维模型)对于跨断层埋地管道响应分析影响较小,主要是由于  $\Delta Y$  相对于  $\Delta Z$  较小,且  $\Delta Y$  主要引起管道弯曲,对管道的最大轴向拉应变和压应变的影响较小。因此,随机模拟可采用 2D 模型,以提高计算效率。

(2)敏感性分析的结果表明,跨断层埋地管道的动力响应对于地震震级和管壁厚度较为敏感,管道的失效概率随着地震震级的增加迅速增加。因此,在设计中应合理确定地震震级。管道的失效概率随着管壁厚度的增加逐渐下降,增加管壁厚度可以提高跨断层管道的安全性和可靠性。另一方面,填土埋深对管道的失效概率的影响较小。

(3)在本文算例中,管道厚度增加到 20 mm 时,管道的失效概率仍大于 50%,管道的安全性和可靠性较低,仅依赖增加管壁厚度并不能有效提高管道的安全性和可靠性。本文算例中可以考虑采用强度更高的管材(比如 Q345 或管线钢等)或者减小断层与管道的夹角以降低轴向位移荷载从而提高工程的安全性。 □

## 参考文献:

- [1] 史永霞. 埋地管道在沉降情况下的响应分析[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2007: 1-3.
- [2] 储阳华, 娄彦鹏, 张蹦蹦. 断层错动下管道抗震研究[J]. 管道技术与设备, 2017(4): 11-14.
- [3] VAZOURAS P, KARAMANOS S A, DAKOULAS P. Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements[J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2010, 30(11): 1361-1376.
- [4] VAZOURAS P, KARAMANOS S A, DAKOULAS P. Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults [J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2012, 41: 164-180.
- [5] 中国石油管道局工程有限公司. 油气输送管道线路工程抗震设计规范: GB/T50470-2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017: 21.
- [6] American Lifelines Alliance. Seismic guidelines for water pipelines [M]. Hyattsville: Federal Emergency Management Agency, 2005: 22.
- [7] Pipeline Research Council International. Guidelines for the seismic design and assessment of natural gas and liquid hydrocarbon pipelines [M]. Houston: Technical Toolboxes Inc, 2004: 24.
- [8] 马超, 谭东杰, 李亮亮, 等. 基于ABAQUS的管土相互作用计算方法研究[J]. 中国化工贸易, 2013(7): 49-50.
- [9] 徐平. 采动沉降影响下埋地管道与土相互作用及力学响应研究[D]. 江苏徐州: 中国矿业大学, 2015: 78-85.
- [10] 沈新普. ABAQUS在能源工程中的算例和应用[M]. 沈阳: 机械工业出版社, 2010: 35-55.
- [11] SHI J W, WANG Y, CHEN Y H. A simplified method to estimate curvatures of continuous pipelines induced by normal fault movement[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(3): 343-352.
- [12] 李杰. 生命线工程抗震基础理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 51-63.
- [13] 樊恒, 谢鑫芳, 谢韵, 等. 基于应变设计的长距离输送管道抗震可靠度评估方法[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(23): 181-184.
- [14] 陶凯尔, 孙欲为. 穿越断层埋地管道的抗震可靠度分析[J]. 工程技术研究, 2017(9): 1-4.
- [15] WANG Y, AKEJU O V, CAO Z J. Bayesian equivalent sample toolkit (BEST): an Excel VBA program for probabilistic characterization of geotechnical properties from limited observation data [J]. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2016, 10(4): 251-268.
- [16] 何正勤, 胡刚, 鲁来玉, 等. 云南通海盆地的浅层速度结构[J]. 地球物理学报, 2013(11): 219-227.
- [17] 姜朝松, 周瑞琦, 胡耀雄. 昆明盆地的地质构造特征[J]. 地震研究, 2003, 26(1): 67-74.
- [18] 林凤仙, 段继平, 杨江华. 悬挂式测井仪在场地震反应剪切波速测试中的应用[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2012, 34(增刊2): 256-259.
- [19] WELLS B D L, COPPERSMITH K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(4): 974-1002.
- [20] JOSHI S, PRASHANT A, DEB A, et al. Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion [J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2011, 31(7): 930-940.
- [21] 史江伟, 陈丽. 不均匀土体位移引起地下管道弯曲变形研究[J]. 岩土力学, 2017(4): 1164-1169.
- [22] 舒畅. 跨断层埋地输气管道安全评价技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018: 16-24.
- [23] Committee on Gas and Liquid Fuel Lifeline. Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems [M]. New York: American Society of Civil Engineers, 1984: 151-176.
- [24] 吴德荣. 石油化工装置配管工程设计[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2013: 152-154.
- [25] AGAIBY S S, MAYNE P W. Relationship between undrained shear strength and shear wave velocity for clays [C]//6th Symp. on Deformation Characteristics of Geomaterials. Amsterdam: IOS Press, 2015: 358-365.
- [26] 朱庆杰, 陈艳华, 蒋录珍. 场地和断层对埋地管道破坏的影响分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2392-2396.
- [27] 冯启民, 赵林. 跨越断层埋地管道屈曲分析[J]. 地震工程与工程振动, 2001(4): 80-87.
- [28] 胡明伟, 林均岐, 李祚华, 等. 跨越断层埋地管道地震反应研究述评[J]. 地震工程与工程振动, 2005(1): 159-163.

· 信息 ·

## 摘要编写须知

摘要(abstract)是对科技论文、学术报告的主要内容(primary contents)的准确概括而不加任何注释和评论的简短陈述(brief)。其内容可分为两大类:一类是说明性或陈述性摘要(descriptive or indicative abstract)。说明性摘要或称指示性摘要,只说明论文或报告的主题思想,一般不介绍文章的内容。而陈述性摘要除了陈述主题思想外,还要陈述论文的中心句及中心事物。另一类是资料性摘要(informational abstract)和报道性摘要(informative abstract)。这类摘要除了介绍文章的要点外,还要扼要地介绍文章的主要内容,即主要信息(primary information)。一般摘要的篇幅以200~300字为宜。从语言修辞上讲,应是开门见山,直入主题,准确简练,内容精练。从语言结构上讲,尽量不要使用复杂的长句,应广泛使用非谓动词和被动语态常见形式。英文摘要的基本内容:①从事此项研究的目的,即研究工作的缘由、问题、重要性;②研究内容及过程;③所取得的成果或结论;④所获成果或所获结论的意义及重要性。

(本刊编辑部)