

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.02.016

穿越正断层埋地管线的破坏模式分析

薛娜¹, 李鸿晶², 李秀菊², 金浏², 翟聚云¹

(1. 河南城建学院 土木工程学院, 河南 平顶山 467036; 2. 南京工业大学 土木工程学院, 南京 210009)

摘要:在正断层引起的地面永久性大变形作用下,埋地管线可能会发生拉伸、剪切等形式的强度破坏,亦可能在局部受压区发生屈曲破坏。利用 ABAQUS 有限元分析软件,建立穿越正断层埋地管线的空间有限元分析模型,采用非线性接触分析方法模拟正断层引起的地表永久性大变形作用下管线—土体间的相互作用,分析了不同管径、跨越角对管线破坏模式的影响。依据算例分析可知:小口径埋地管线易发生拉伸强度破坏,大口径薄壁管线易发生屈曲失效,口径 0.65 m 是管线从发生强度破坏到发生屈曲破坏的临界值;当跨越角大于 90°时,角度越大越易发生屈曲失效,跨越角为 100°是埋地管线发生强度破坏与屈曲失效的分界点。

关键词:正断层作用;埋地管线;非线性接触;破坏模式

中图分类号:TU43

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2016)02-123-08

Analysis of the failure modes for continuous buried pipeline crossing the normal fault region

XUE Na¹, LI Hongjing², LI Xiuju², JIN Liu², ZHAI Juyun¹

(1. College of Civil Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, Henan, P.R.China; 2. College of Civil Engineering Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, P.R.China)

Abstract: Tensile, shear strength and other forms of damages, even buckling failure in local compression zones will happen to buried pipelines under the action of ground permanent large deformation caused by normal fault movement. We used ABAQUS software to establish a three-dimensional pipe-soil interaction model under the ground permanent deformation, adopted nonlinear contact method to simulate the pipeline-soil interaction, and analyzed the influence of different pipe-diameters and crossing angles on the failure mode. By analyzing some examples, it is showed that tensile strength damage is prone to happen to small-diameter pipelines, while buckling failure to thin-wall large-diameter pipelines, and the critical value of pipe-diameter from intensity damage to buckling failure is 0.65 m. When crossing angle is bigger than 90°, the bigger the angle is, the easier buckling failure happens. And the critical value of crossing angle from intensity damage to buckling failure is 100°.

Keywords: normal fault; buried pipeline; nonlinear contact; failure mode

收稿日期:2015-11-25

基金项目:国家自然科学基金项目(50678084);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(自然科学)(CXZZ11_0344);河南省高等学校重点科研项目(15A560003,14B560027);河南城建学院科学研究基金(2014JZDXK001)。

Supported by National Natural Science Fund of China (50678084), Scientific Research Fund for graduate students of Jiangsu Province (Natural Science)(CXZZ11_0344), Scientific Research Fund for Higher Education of Henan Province (15A560003, 14B560027) and Scientific Research Fund of Henan University of Urban Construction (2014JZDXK001).

作者简介:薛娜(1981-),女,河南城建学院讲师,博士,主要从事生命线地震工程研究,(E-mail)snowxuena@163.com。

管线是重要的基础设施,多埋于地下,在强烈地震中具有很大的脆弱性。管线失效或破坏不仅经济损失巨大,而且会导致生产活动停止和物质泄漏,所造成的次生灾害、环境影响等间接损失是难以估量的^[1]。依据现有研究和地震灾害资料可知,引起埋地管线破坏的最主要因素是断层引起的地表永久性大变形,其次是场地液化,最后是强地面运动^[2]。工程中常用的埋地管线主要包括,带接头的非连续性管线(例如大部分的供水管线)和不带接头的连续性管线(一般为输油或输气的钢管或 PE、PVC 塑料管)。实际震害表明:非连续性管线的破坏主要发生在接头处,而不是管体本身;而对于连续管线,其破坏形式可以分为拉伸失效的强度破坏以及发生失稳的屈曲失效。强度破坏包括管线受到拉伸、弯曲、剪切等作用时产生的破坏;屈曲破坏形式可以分为梁式屈曲、壳式屈曲、铰式屈曲等形式的整体屈曲失效和局部屈曲失效。这两类破坏常常导致管体的大变形及管线的破裂和其服务功能的中断。埋地管线破坏模式研究将加深对埋地管线断层反应行为和破坏机理规律的认识,为埋地管线抗震设计及施工等提供支撑。

在断层引起的地表永久性大变形作用下埋地管线反应分析已有四十多年的研究历史,发展了多种理论分析方法,如 Newmark 方法^[3]、Kennedy 方法^[4]、Wang 方法^[5]以及数值分析方法^[6-7],主要包括梁单元分析模型、壳单元分析模型等^[8-10]。在这些工作的基础上,逐步建立了埋地管线抗震设计理论与计算方法,并制定了相应的抗震设计规范和施工规程,提高了埋地管线抵御断层作用的能力。虽然在穿越断层的埋地管线反应分析研究方面已经取得了较大进展,但目前仍然没有完全解决这个科学难题,对于管-土接触非线性行为^[11-16]、埋地管线破坏机理(如强度破坏、屈曲破坏的机理)、断层特征对埋地管线的影响等问题还需要深入研究。

地表永久性大变形下埋地管线的破坏形式主要与管径、壁厚、穿越角度、场地条件及管材、断层位错量等参数有关,当断层的错动量较大时,管线和土体都将进入到非线性状态,这时管线与土体之间的接触分析也将变得非常复杂。目前处理管-土相互作用时,多将土体对埋地管线的约束作用简化为一系列弹簧支座^[8-9,17],而土体材料的强非线性导致了等效土弹簧参数较难确定。文中采用非线性接触的处理方法,基于 ABAQUS 有限元分析平台,建立了穿越正断层埋地管线-土体相互作用的有限元分析模型,分析了正断层作用下管径、跨越角度(管线跨越土体破裂带的角度)等因素对埋地管线破坏模式的影响,给出了正断层作用下管线强度破坏与屈曲失效的临界条件。管线强度破坏主要指由于管线的拉伸变形超过管材的屈服值而引起的拉伸断裂破坏;屈曲失效是指管线达到管线屈服值前由于局部变形过大导致的破坏。

1 研究方法

1.1 管-土系统有限元模型

一般认为,正断层是在重力和水平张力作用下形成的,其特征是主动盘相对于被动盘沿着断层面面向下方运动,即主动盘相对下降、被动盘相对上升。同逆断层不同,正断层的倾角较大,一般大于 45° 。为了模拟正断层的运动特征,从地球半无限空间中取出部分土体建立有限元模型。模型中土体被分为左、右两部分,分别描述断层错动中的被动盘和主动盘,如图 1 所示。其中主动盘和被动盘是分离的,可以产生相对位移但不可相互侵入,因此认为被动盘是固定的,而主动盘可以沿着断层面面向下方运动或产生张离位移,但不可侵入被动盘内部。将主动盘和被动盘的土体均视为可变形的连续介质,并分别以八节点三维实体单元离散。假定断层破碎带宽度为零,即主动盘、被动盘临近断层面的诸单元在几何上是相互接触的。

以长连续埋地直钢管为研究对象,管线无接头。在地震中,断层运动导致上覆土体变形甚至破裂,有些传递至地表而形成地面永久变形。埋地管线受到周围土体的约束作用,主动盘和被动盘的相对位移被施加于管线上,使管线产生反应。为了模拟这个物理过程,在上述断层上覆土体有限元模型中加入管线结构,贯穿主动盘和被动盘,如图 1 所示。按照该模型,一半管线被埋于主动盘中而另一半埋于被动盘内。当主动盘相对于被动盘运动时,管土间的摩擦力将使管线产生反应。将管线视作中空的空间薄壁结构,并利用四节点薄壳单元进行离散。管线与土体间的相互作用则采用非线性接触的处理方法进行模拟和分析。

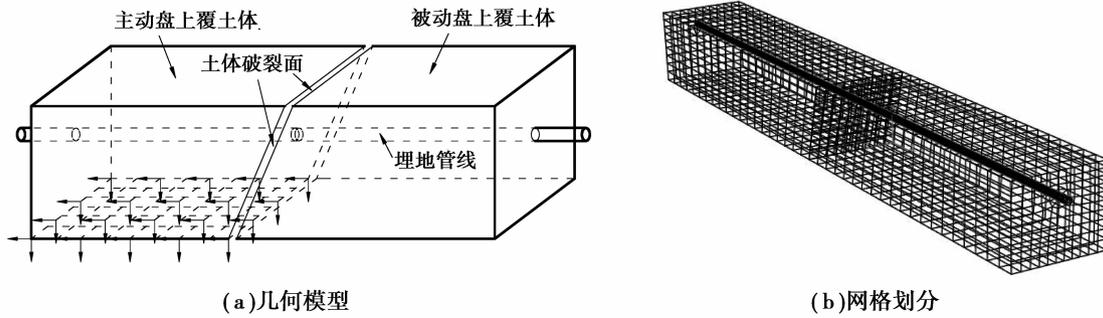


图 1 埋地管线分析模型

Fig.1 Analysis model of buried pipeline subject to fault

由图 1 可知,穿越正断层区域的埋地连续管线分析模型包含管线及其周围土体介质,由 6 个平面边界围成。各边界条件分别为:顶边界为地表自由面,无约束;左、右端面与埋地管线垂直,主动盘一侧的边界取为自由边界,被动盘一侧取为固定边界。因为当计算区域沿管线纵向长度为 240~300D(D 为管线直径)时,管—土间的摩擦力就会足够大,使主动盘、被动盘运动造成的管线变形不足以传递至左、右边界,任何边界条件不会对管线反应分析结果产生影响^[14,17];前、后边界平面与管线平行,主动盘一侧只约束前后方向的自由度,在左右和上下方向上是自由的,被动盘一侧取为固定边界。这是由于只有在结构横向尺寸 5 倍范围内的土体才会影响结构的反应^[18],当前、后边界位于该范围之外时这种边界条件是符合实际情况的。底平面边界同样与管线平行,主动盘一侧为自由边界,被动盘一侧取为固定边界。对于正断层,在主动盘一侧位于管线之下的土体对管线无影响,而在被动盘一侧需要将边界置于管线导致的土体变形范围之外,该土体变形同断层位错量、土体压缩模量以及管道材料、管径、埋深等因素有关。

在上述埋地管线—土体系统有限元模型中,环境激励主要为断层的运动位移。这是因为管线被周围土体紧密约束而不能自由运动,地震波动的惯性效应对管线反应影响很小,主要表现在土体和管线不同位置的动态响应由于相位差而产生的影响。所以断层运动对埋地管线的作用一般被认为是一种伪静力作用,可以在主动盘底平面边界各单元节点上均施加相同的位移。该位移由竖向分量 R_v 和水平分量 R_h 组成,大小与断层位错量相对应。各土体单元均受到体积力(重力)的作用,当主动盘底平面边界发生位移时该作用导致管线及土体产生变形。

主动盘与被动盘间的相互作用采用非线性接触方法进行模拟,主动盘与被动盘之间的摩擦系数 μ 利用土体的摩擦角 φ 进行表述,即: $\mu = \tan \varphi$ 。

1.2 材料本构

文中埋地钢管的本构关系选用三折线的理想弹塑性模型,应力—应变关系如图 2 所示。它由弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段 3 个阶段组成。由于埋地管线处于复杂的受力状态,可以采用金属材料常用的 Von-Mises 屈服准则来判断管线的应力—应变是否进入塑性屈服状态。在管截面任意一点,将其截面应力或者应变作为该点的总应力或总应变。依据总应力或总应变来判断埋地管线是否进入弹塑性状态或塑性状态。

$$\sigma_{\text{Von-Mises}} = \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]};$$

$$\epsilon_{\text{Von-Mises}} = \sqrt{\frac{1}{6} [(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_x - \epsilon_z)^2 + 6(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)]}。$$

式中: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为截面在 x, y, z 方向的正应力分量; $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 分别为截面在 x, y, z 轴方向上的正应变分量; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 为剪应力, $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ 为剪应变。采用岩土工程中常用的 Mohr-Coulomb 模型来描述埋地管线周围土体介质的本构关系,如图 3 所示。

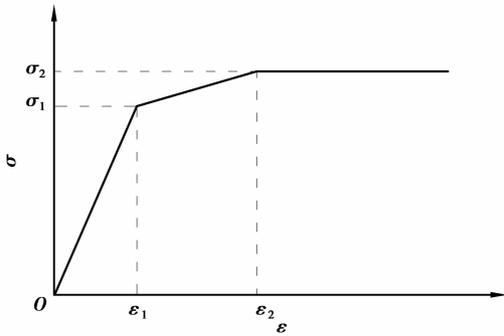


图 2 管线应力—应变曲线

Fig.2 The stress-strain curve of pipeline

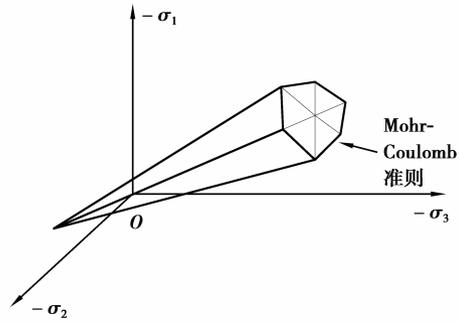


图 3 土体本构模型

Fig.3 Constitutive model of soil

依据《输油(气)埋地钢质管道抗震设计规范》(SY/T0450-1997),地震中断层错动引起土壤和管线的大位移情况下,管线容许拉伸应变 $[\epsilon_r]_F$ 取管材应力—应变三折线中弹塑性区与塑性区交点处的应变值 ϵ_2 ,一般取为总应变的4%左右。当管线受到压缩时,受压区管线局部管壁会发生屈曲,埋地管线由于屈曲失稳而产生破坏,埋地管线一旦发生屈曲失稳便立即退出工作。

1.3 初始应力场

加载之前,土体处于固结状态,具有一定的初始应力。为方便起见,取土体自重产生的应力场(不考虑埋地管线自重的影响)作为分析的初始力学状态。其竖向应力随深度线性变化,水平应力 σ_x 、 σ_y 主要是由于土体的泊松效应引起的,按照弹性理论假定,水平与竖向应力的关系为

$$\sigma_z = \rho gh;$$

$$\sigma_x = \sigma_y = k_0 \sigma_z。$$

式中: σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的正应力; h 为计算点土体深度; ρ 为土体密度; g 为重力加速度,计算中近似取 $g=10 \text{ m/s}^2$; $k_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$ 为静止侧压力系数,其中 ν 为应力计算点土体的泊松比。

计算时,在该管土系统模型施加断层位移作用前首先执行地应力分析步。即计算土体重力引起的地应力分布场,并将其作为初始应力条件添加至各个单元中,然后才开始执行管线和土体响应的分析程序,获得对埋地管线断层响应行为的认识。

2 计算分析

埋地管线为连续直钢管,本构关系如图2所示取三折线应力—应变关系,依据钢材的材料特性,管线弹性模量取为210 GPa,当应力达到418 MPa时管线开始进入弹塑性阶段,当应力与塑性应变分别达到516 MPa、0.016时进入完全塑性状态,泊松比 $\nu=0.3$ 。土体本构利用Mohr-Coulomb模型表述,如图3所示,具体参数见表1。依据工程经验,取土体剪胀角小于内摩擦角。钢管与土体间的摩擦系数取为0.6。

表 1 土体介质参数表

Table1 Parameters of the surrounding soil

密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	弹性模量 E / MPa	泊松比 ν	黏聚力 c / kPa
1.85	15	150	0.45	25

为了研究地面永久变形下埋地管线的反应规律,对管线的破坏过程进行数值模拟分析。选取控制截面 1 和 2 为判断依据,它们位于埋地管线轴向拉伸应力和弯曲应力总和最大的地方,如图 4 所示。文中的破坏模式分析结果主要基于控制截面 1 和 2 上的反应情况而做出的。

影响埋地管线破坏模式的因素有很多,诸如管径、壁厚、场地条件、管材特性及跨越角度、位错量(主动盘底边界的断层位移量)等。这里主要分析埋地钢质连续管线的管径以及跨越角度等对管线破坏模式的影响,寻找管线发生拉伸失效的强度破坏及发生屈曲失效的失稳破坏的临界条件。依据现有研究^[14,17],分析模型中主动盘和被动盘沿管轴向的长度均取为 300D。

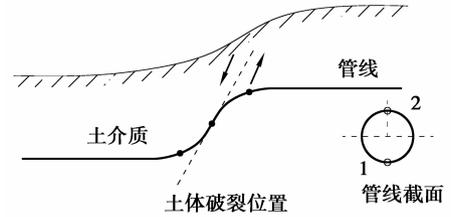


图 4 分析模型控制截面示意图

Fig.4 Control-section of the analysis model

表 2 材料参数表

Table 2 Material parameters

埋深 H/m	跨越角 $\beta/(\circ)$	管径 D/m	壁厚 t/m	摩擦系数 μ
3	95	—	0.01	0.6
3	—	0.6	0.01	0.6

2.1 管径对破坏模式的影响

图 5 是同一加载条件下不同管径的管线在断层作用下的反应情况。从图 5(a)中可以看出随着位错量的增大,管线的峰值拉伸应变迅速随之增大,由于管线进入非线性,其增大的幅度减小;其次,可以看出不同管径下管线反应情况不同,管径越大,管线的反应越小,这也说明了在进行管线抗震设计及施工时,同条件下应尽量采用较大口径的管线。此外,不同的管径达到容许拉伸应变时所需施加的断层错动量不同,比如对于 0.4 m 口径的管线达到拉伸应变极限时所需的土体位错量为 2.82 m,而对于 0.6 m 口径的管线产生拉伸破坏时所需的位错量为 3.53 m;管径越大,管线产生拉伸破坏时所需的错动量便越大。该结论亦同时验证了,同条件下口径较大管线的抗断层能力优于口径较小管线。通过计算分析,可以得到不同管径下产生拉伸破坏时所能承受的极限位错量值。

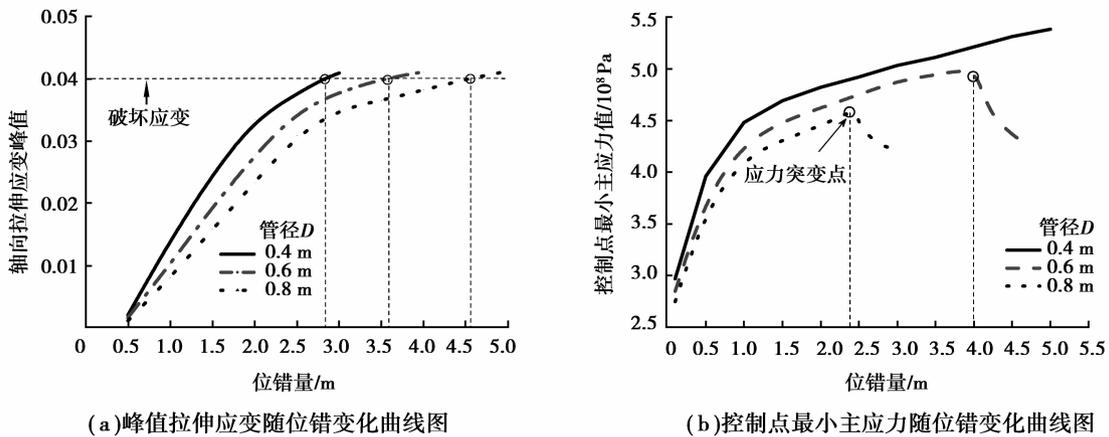


图 5 管径对管线反应的影响

Fig.5 Influence of pipe diameter-thickness ratio to pipeline response

图 5(b)给出的是受压区控制截面上控制点最小主应力随位错量变化的曲线图,可以看出,随着位错量的增加,受压区控制点的最小主应力先缓慢增大,待达到一定程度时,会出现应力突降的情况,正如图中所示,

这是一种强失稳屈曲行为。该屈曲失稳行为常常导致管线较大的局部变形,导致管子的破裂和其服务功能的中断。对于薄壁管线及逆断层情况下,管子受压侧容易产生翘式屈曲变形,一旦屈曲,管子很快破坏失效。对于厚壁管线,则更多发生的是椭圆化变形,管子随外荷载增大慢慢变形及至破坏。对于口径为 0.6 m 和 0.8 m 而壁厚为 0.001 m 的薄壁管线来说,都出现了如上所述的屈曲行为,而对于 0.4 m 口径的管线将很难发生屈曲现象。当然,不难看出,同一壁厚的管线口径越大,发生屈曲行为的临界位错量越小,越容易产生屈曲失效。进行一些数值计算,得到了不同管径下管线发生屈曲失效时的临界位错值,如表 3 所示。表 3 是不同口径的管线在地震断层错动下的破坏模式。表中 Δ_1 为拉伸破坏时对应的极限位错量, Δ_2 为屈曲失稳时对应的极限位错量。从表 3 中可以看出随着管径 D 的增大,发生拉伸破坏的极限位错量 Δ_1 随之增大,发生屈曲失效的临界位错量 Δ_2 随之慢慢减小;当管径 D 为 0.65 m 时,两位错量值相当。当口径小于 0.65 m 时管线易发生拉伸强度破坏;而口径大于 0.65 m 时管线发生拉伸破坏所需的位错量大于产生屈曲失效所需的位错量,即管线较易发生屈曲失稳破坏。从而口径 $D=0.65$ m 是地面永久变形下埋地管线从强度破坏到屈曲失效的临界点。

表 3 管径不同时管线破坏模式
Table 3 Pipe failure-pattern with different pipe-diameter

管径 D/m	0.2	0.4	0.5	0.6	0.65	0.7	0.8	1.0
Δ_1/m	2.15	2.82	3.05	3.53	3.87	4.16	4.52	5.11
Δ_2/m	—	—	—	4.01	3.84	2.97	2.44	1.56
破坏形式	强度破坏	强度破坏	强度破坏	强度破坏	两者	屈曲失效	屈曲失效	屈曲失效

2.2 跨越角对破坏模式的影响

图 6 是跨越角度不同时,埋地管线应力、应变随位错变化而变化的曲线图。图 6(a) 是不同跨越角度下管线峰值拉伸应变随位错增大而增大直至破坏的反应图。由图 6(a) 可以看出,跨越角为 60° 时管线反应比跨越角为 95° 和 100° 时剧烈得多,在位错量到 2.95 m 时便达到拉伸破坏应变值。图 6(b) 是压缩区某控制点最小主应力随位错变化而变化的趋势图。由图 6(b) 可以发现,跨越角为 60° 时管线控制点最小主应力没有发生突降行为,也没有发生屈曲失效;对于跨越角为 95° 和 100° 的管线,分别在位错量为 4.01 m 和 3.52 m 时发生屈曲失效;当跨越角大于 90° 时,角度越大,受压区越容易发生屈曲失效,如表 4 所示。

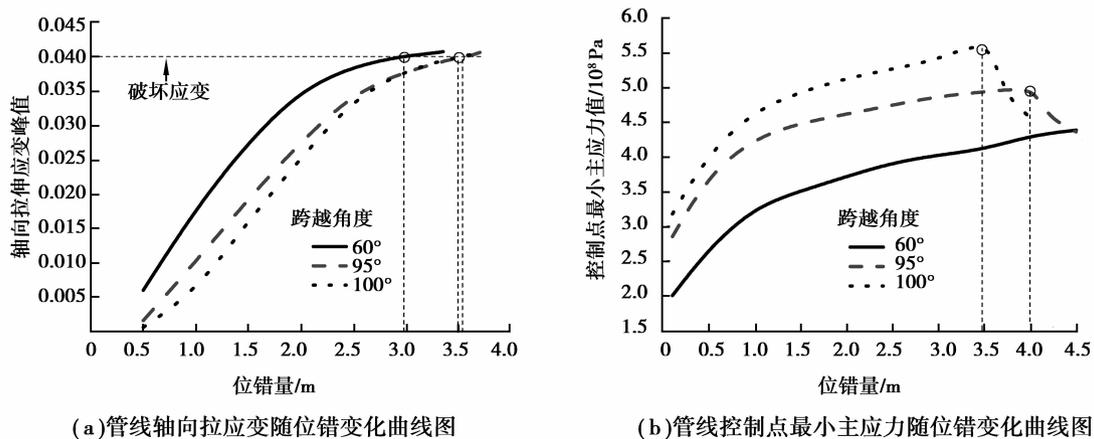


图 6 跨越角度对管线反应的影响

Fig.6 Influence of different crossing angle to pipeline response

表 4 不同跨越角度下管线破坏模式
Table 4 Pipe failure-pattern with different crossing angle

跨越角/(°)	60	75	90	95	100	105	120	135
Δ_1/m	2.95	3.47	3.97	3.53	3.48	3.30	3.29	3.15
Δ_2/m	—	—	4.32	4.01	3.52	3.39	2.47	1.93
破坏形式	强度破坏	强度破坏	强度破坏	强度破坏	两者	屈曲失效	屈曲失效	屈曲失效

注:表中 Δ_1 为管线达到拉伸应变峰值时所施加的位错量; Δ_2 为管线发生屈曲失稳时所对应的临界位错量。

表 4 是不同跨越角度时管线在断层错动下的破坏反应情况。可以看出,当跨越角度小于 90° 时,管线很难发生屈曲失效行为,且管线受到的轴向拉伸反应较为剧烈,很快便产生拉伸破坏失效;当跨越角度大于 90° 时,管线发生屈曲失效的临界位错量随角度增大而不断减小,角度越大,越容易发生屈曲行为;当跨越角度为 100° 时,管线发生拉伸失效所需位错量 Δ_1 与产生屈曲失稳所需错动量 Δ_2 相当。从而跨越角度为 100° 是埋地管线破坏为强度破坏到屈曲失效的分界点。

3 结 论

采用非线性接触的处理方法建立了埋地管线—土体相互作用模型,分析了在正断层引起的地面永久变形作用下不同管径及跨越角度对钢质连续埋地管线破坏模式的影响,得到如下结论:

1) 随着管径 D 的增大,发生拉伸破坏时所需要的位错量 Δ_1 随之增大,发生屈曲失效的临界位错量 Δ_2 随之缓慢减小;当管径 D 为 0.65 m 时,两者相当。

2) 口径小于 0.65 m 时管线发生拉伸强度破坏;而口径大于 0.65 m 时管线发生拉伸破坏所需的位错量大于产生屈曲失效所需的位错量,即为屈曲失稳破坏。

3) 跨越角度小于 90° 时,管线很难发生屈曲失效行为,且管线受到的轴向拉伸反应较为剧烈,很快便产生拉伸破坏失效。

4) 跨越角度大于 90° 时,管线发生屈曲失效的临界位错量随角度增大而不断减小,角度越大,越容易发生屈曲行为;角度为 100° 是埋地管线破坏为强度破坏到屈曲失效的分界点。

参考文献:

- [1] 傅俊,孙千伟,刘威.埋地管线地震反应找那个日美规范对比研究[J].结构工程师,2013,29(3):85-92.
FU Jun, SUN Qianwei, LIU Wei. Comparison of buried pipeline seismic response analysis methods among Chinese, Japanese and American codes [J]. Structural Engineers, 2013, 29(3): 85-92. (in Chinese)
- [2] Orourke T D, Palmer M C. Earthquake performance of gas transmission pipelines [J]. Earthquake Spectra, 1996, 12(3): 493-528.
- [3] Newmark N M, Hall W J. Pipeline design to resist large fault displacement[C]. Proceedings of U. S. NCEE. Ann Arbor: University of Michigan, 1975: 416-425.
- [4] Kennedy R P, Darrow A W, Williamson R A. Fault movement effects on buried oil pipeline [J]. Journal of the Transportation Engineering Division, ASCE, 1977, 103(5): 617-633.
- [5] Wang L R L, Yeh Y H. A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement [J]. International Journal of Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1985(13): 75-96.
- [6] O'rourke M J, HmadiK E. Analysis of continuous buried pipelines for seismic wave effects [J]. International Journal of Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1988(16): 917-929.
- [7] Liang J W. Dynamic response of pipelines laid through alluvial valley [J]. Transactions of Tianjin University, 1995, 1(1):

89-92.

- [8] 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 crossings [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(12): 98-104. (in Chinese)
- [9] 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,2001,21(4):81-87.
FENG Qimin, ZHAO Lin. Buckling analysis of buried pipes subjected to fault movements [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(4): 81-87. (in Chinese)
- [10] 岳庆霞,吴华勇,李杰.管土动力相互作用分析[J].地震工程与工程振动,2007,27(3):132-136.
YUE Qingxia, WU Huayong, LI Jie. Analysis of pipe-soil dynamic interaction [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(3): 132-136. (in Chinese)
- [11] 李昕,周晶,陈健云.考虑土体非线性特性的直埋管道-土体系统的动力反应分析[J].计算力学学报,2001,18(2):167-172.
LI Xin, ZHOU Jing, CHEN Jianyun. Dynamic response on straight buried pipeline considering non-linear soil model [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2001, 18(2): 167-172. (in Chinese)
- [12] 王滨,李昕,周晶.地震断层作用下的埋地管道等效分析模型[J].防灾减灾工程学报,2009,29(1):44-60.
WANG Bin, LI Xin, ZHOU Jing. An equivalent analytical model of buried pipelines subject to fault movement [J]. Journal of Disaster and Mitigation Engineering, 2009, 29(1): 44-60. (in Chinese)
- [13] 林均岐,胡明祯,申选召.跨越断层埋地管线地震反应数值分析[J].地震工程与工程振动,2006,26(3):186-192.
LIN Junqi, HU Mingyi, SHEN Xuanzhao. Numerical analysis of seismic response of buried pipelines crossing fault [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(3): 186-192. (in Chinese)
- [14] 金浏,李鸿晶,姚保华.埋地管线-土体相互作用分析计算区域的选取[J].南京工业大学(自然科学版),2009,31(3):37-41.
JIN Liu, LI Hongjing, YAO Baohua. Determination of interaction area in pipeline-soil system under ground permanent deformation [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 31(3): 37-41. (in Chinese)
- [15] 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.
ZHU Qingjie, CHEN Yanhua, JIANG Luzhen. Influences of site and faults on damage of buried pipelines [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2392-2396. (in Chinese)
- [16] 李鸿晶,金浏.穿越断层埋地管线反应数值模拟-建模中的几个具体问题[J].自然灾害学报,2011,20(3):151-156.
LI Hongjing, JIN Liu. The considerations in modeling of numerical simulation for buried pipelines crossing an earthquake fault [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(3): 151-156. (in Chinese)
- [17] 赵雷,石志晓,李小军,等.跨逆断层埋地管线失效模式的数值模拟分析[J].土木建筑与环境工程,2010,32(S2):574-577.
ZHAO Lei, SHI Zhixiao, LI Xiaojun, et al. Numerical analysis of failure mode of buried pipelines crossing reverse fault [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2010, 32(S2): 574-577. (in Chinese)
- [18] 陈国兴,庄海洋,杜修力,等.液化场地土-地铁车站结构大型振动台模型试验研究[J].地震工程与工程振动,2007,27(3):163-170.
CHEN Guoxing, ZHUANG Haiyang, DU Xiuli, et al. Large-scale shaking table test for subway station structure built in liquefiable saturated fine sand soil [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(3): 163-170. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)