王桂萱,方林超,赵杰.反应位移法在埋地腐蚀管线抗震分析中的应用[J].地震工程学报,2017,39(1):0001-0007.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.01.0001

WANG Gui-xuan, FANG Ling-chao, ZHAO Jie. Application of the Response Displacement Method to the Aseismic Analysis of Corroded Buried Pipeline[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1):0001-0007. doi:10.3969/j.issn.1000-0844. 2017.01.0001

# 反应位移法在埋地腐蚀管线抗震分析中的应用。

## 王桂萱,方林超,赵 杰

(大连大学土木工程技术研究与开发中心,辽宁 大连 116622)

摘要:理地管线作为油、气、水等的传输载体,是地下工程的重要设施之一。埋地管线特别是金属管 线容易发生腐蚀现象,在地震灾害的影响下,含有腐蚀缺陷的管线容易发生泄漏和断裂事故,造成 巨大的资源浪费和环境污染等损失。因此埋地腐蚀管线抗震性能研究的重要性也越发凸显。本文 以埋地腐蚀管线为研究对象,探索管线腐蚀深度、宽度、腐蚀位置和腐蚀管线埋深等腐蚀参数对管 线抗震性能的影响,旨在为管线的安全性和实用性提供理论参考,对管线是否继续使用、维护或更 换和安全生产提供指导,以及为管线的抗震设计提供基础研究。本文运用反应位移法在有限元软 件 ANSYS 上实现各参数下的埋地腐蚀管线的地震响应分析。

关键词: 埋地管线; 反应位移法; 腐蚀参数; 抗震性能; 地基弹簧系数

 中图分类号:TG172;TU311
 文献标志码:A
 文章编号:1000-0844(2017)01-0001-07

 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.01.001

## Application of the Response Displacement Method to the Aseismic Analysis of Corroded Buried Pipeline

WANG Gui-xuan, FANG Ling-chao, ZHAO Jie

(Civil Engineering Technology Research and Dvevlopment Center, Dalian University, Dalian 116000, Liaoning, China)

Abstract: As the transmission carriers of oil, gas, and water, buried pipelines are one of the important facilities in the field of underground engineering. With the increased usage of buried pipelines, those that are under the influence of transport medium as well as the soil and loading environment, especially metal pipelines, are prone to corrosion. After a major earthquake, a pipeline with existing corrosion defects can be prone to leakage and fracture accidents, resulting in a huge waste of resources, environmental pollution, and even the death of humans and animals. Therefore, research on the seismic performance of buried corrosion pipelines has become increasingly important. This paper examines buried pipelines and explores the impacts of pipeline corrosion depth, corrosion width, and corrosion location on the seismic performance of the buried pipelines. The purpose is to provide a theoretical reference for the safety and practicability of pipelines; provide guidance on the continued use, maintenance or replacement and safety of pipelines; and pro-

① **收稿日期:**2015-06-02

基金项目:辽宁省教育厅项目(L2015035);大连市科技计划项目(2014E13SF145)

作者简介:王桂萱(1960-),男,博士,教授,主要从事岩土与地下工程、工程抗震研究。E-mail:tumuxinxi@163.com。

通信作者:方林超(1989-),男(汉族),硕士研究生,主要从事结构抗震研究。E-mail:1252840444@qq.com。

vide data to encourage further research on the seismic design of pipelines. This paper takes the actual project as the background and then analyzes the buried pipeline response under different parameters in the finite element software ANSYS using the seismic response displacement method. **Key words:** buried pipeline; seismic deformation method; corrosion parameter; seismic

performance; foundation spring constant

### 0 引言

地下管线在城市发展以及能源运输中发挥着重 要作用。近年来通过地震灾害数据表明,地震对管 线的破坏是很严重的,管线本身破坏的同时也会带 来次生灾害的威胁,并给灾后重建带来困难<sup>[1]</sup>。埋 地管线,特别是金属埋地管线随着使用时间的积累, 管线在外部环境和内部介质的作用下,会引起管线 的腐蚀<sup>[2-3]</sup>。在地震灾害,尤其是强地震灾害的作用 下,对已经腐蚀的管线危害巨大,能使管线发生大范 围的损坏,严重影响人们的生产生活。因此在管线 的建设工程中需要把腐蚀因素考虑进去,研究其对 管线抗震性能的影响<sup>[4]</sup>。

对腐蚀管线破坏机理的研究,从上世纪70年代 就已开始。通过前人的理论和试验研究,得到一种 含有腐蚀管线的强度评估理论,如美国的ASME B31G和API579,挪威的DNVRP-F101,英国的 BS7910等。ShiroTakada等<sup>[5]</sup>利用管线的薄壳单 元模型,对在几种参数条件下跨越断层处管线的抗 震性能展开了有限元分析。赵林等<sup>[6]</sup>在埋地管线建 模有限元方法的研究中,用土弹簧模拟土体对管线 的作用,管线采用薄壳单元,建立了管-土弹簧模型。 蔡文军等<sup>[7]</sup>在管线剩余强度的研究中,将材料非线 性和几何非线性影响考虑进去,并将有限元分析结 果与ASME B31G规范结果进行对比,结果表明该 方法较为准确。

Newmark<sup>[8]</sup>在埋地管线抗震性能的研究中假 设抗震系统中无惯性力且管线能和土层共同运动, 并在试验中取得了较好的结果,这是当代埋地管线 抗震规范的雏形。目前对含腐蚀缺陷管线的研究一 般包含其极限承载力的研究和剩余强度的评价两个 方面,但相关研究都是在非地震作用前提下进行的。 鉴于此,本文采用有限元软件 ANSYS 建立管线一 弹簧分析模型,运用反应位移法对埋地腐蚀管线在 地震荷载的作用下进行分析计算,得到在地震荷载 作用下腐蚀参数与管线抗震性能之间的联系,从而 为埋地腐蚀管线抗震设计分析提供依据。

### 1 计算原理及方法

#### 1.1 反应位移法基本原理

反应位移法的基本思想是:结构周围地层的运 动决定地下结构在地震时的反应,通过地基弹簧将 土层变形以静荷载的形式施加在结构上,以此求得 结构反应。反应位移法在计算地下结构横断面的地 震响应时,需考虑地层位移、结构周围的剪力及自身 惯性力<sup>[9]</sup>的作用,其计算示意图如图 1 所示。



图 1 地层位移及剪力分布图 Fig.1 Stratigraphic displacement and shear maps

在求解出埋地管线在地基弹簧约束下的相对强 制位移后,进而求出地震土压力 P<sub>2</sub> 以及地层剪切 力作用下的地震反应<sup>[10]</sup>。地震作用下,地层横向 变形:

$$u(z) = \frac{2}{\pi^2} S_{\rm u} T_{\rm s} \cos \frac{\pi z}{2H} \tag{1}$$

管线受到地层位移可按下式转化为随着管线埋 置深度变化的地震土压力:

$$P_{z} = k \left[ u(z) - u(z_{1}) \right]$$
<sup>(2)</sup>

式中:k 为水平方向地层弹性抗力系数。

管线周围土层产生剪切力可由下式计算:

$$\tau_{1} = \frac{G_{d}}{\pi H} \cdot S_{u} \cdot T_{s} \cdot \sin \frac{\pi z_{2}}{2H}$$

$$\tau_{2} = \frac{G_{d}}{\pi H} \cdot S_{u} \cdot T_{s} \cdot \sin \frac{\pi z_{1}}{2H}$$

$$\tau_{3} = 0.5(\tau_{1} + \tau_{2})$$
(3)

#### 1.2 弹簧系数的确定

首先建立无结构存在孔洞二维结构有限元模型 (图 2)。通过在孔洞的四周施加均布荷载 q,由荷载-变形量的关系来计算弹簧刚度系数,而后利用反 应位移法计算模型计算地震反应。弹簧系数 K 按 下式确定[11]:

$$K = \frac{q}{\delta} \tag{4}$$

式中:q 为施加在接触面上的均布荷载;δ 为接触面 上对应的最大位移。

#### 2 埋地腐蚀管线计算模型的建立

### 2.1 模型的建立

实际工程中,通常把管线的腐蚀形式简化为有 等深度腐蚀模型、椭圆腐蚀模型和抛物线腐蚀模型 三种理想化的形状(图 3)<sup>[12]</sup>。









对于上述三种腐蚀类型的腐蚀深度函数  $\alpha(\theta)$  可表示为:

$$\alpha(\theta) = \alpha_{0}$$

$$\alpha(\theta) = \alpha_{0} \sqrt{1 - (\theta/\beta)^{2}}$$

$$\alpha(\theta) = \alpha_{0} (1 - \theta/\beta)^{2}$$
(5)

式中: α。为腐蚀最大深度。

对于上述三种理想腐蚀模型,由前人总结经验可知,抛物线形腐蚀计算结果与试验结果吻合性相 对较好<sup>[13]</sup>。所以本文选取的腐蚀为位于管线内壁 的抛物线形腐蚀。管线模型长度取为10m,管径为 762mm,壁厚为23.8mm,含腐蚀缺陷管线模型划 分了14176个实体单元,14774个节点,腐蚀段有 限元模型如图4(b)所示。计算模型为管线+弹簧 模型,弹簧分别分为径向和切向施加在管线结构上 [图4(c)]。

#### 2.2 计算荷载

管线在实际工程中所承受的荷载是多样化的, 荷载的类型也有较大区别,且管线所敷设的方位和 角度也将对管线造成影响<sup>[14]</sup>。

运行期间的管线主要有以下几种荷载:管线自

重,包括管线内介质的重量和管线防护层重量,相对 于其他荷载而言,管线自重是非常小的,一般可以忽 略不计;管线土压力,管线周围土壤压力是分布在管 线四周的;管线内压,内压是管线所受的主要载荷, 可通过近似计算得到。

地震荷载作为本文研究的重点,应根据反应位移法计算原理,将地震荷载转化为拟静力荷载,即地震位移荷载和地震剪切力,分别将这两种力叠加作用在管线上,从而计算出地震作用下的管线内力。 地层的固有周期  $T_s$ 根据水平地震系数的速度反应 谱取值,土层的固有周期为 0.16 s,根据土质参数计 算得到各参数为:动剪切模量  $G_d = 0.16e9 \text{ N/m}^2$ ;基 岩面的速度反应谱  $S_v = 0.333 \text{ m/s}$ ;设计水平地震 系数为 0.1。

## 3 不同腐蚀参数下的计算结果

通过考虑各腐蚀参数影响的条件下,建立不同 腐蚀深度、不同腐蚀宽度、不同腐蚀位置的腐蚀管线 模型,通过管线的应力-应变分析这些参数对管线抗 震性能的影响。进而分析在不同管线参数下管线在 地震作用下的影响,归纳其影响规律,为地下管线抗 震设计提供依据。



(a)管线局部腐蚀示意图





(c)管线+弹簧局部示意图

图 4 管线腐蚀有限元示意图 Fig.4 Pipeline corrosion FEM schematic

#### 3.1 腐蚀深度对管线横断面抗震性能的影响

通过改变腐蚀深度参数建立不同腐蚀管线的模型,对比管线的应力-应变的分布情况来分析腐蚀深 度参数对管线抗震性能的影响。其深度分别取管线 壁厚的 30%~60%,腐蚀宽度半角β为30°。分别 选取管线发生腐蚀的横断面作为分析对象,且取腐 蚀位置(管线右侧)(①)、顶部(②)、底部(③)、侧面 (④)节点。读取节点位置处的数值进行分析腐蚀管 线。变形图与应力云图如图 5 所示。

由图 5 可以看出,在管线含有腐蚀时,在地震荷载作用下,上下非腐蚀区域变化较小,腐蚀区域应力 呈现出较大的现象,即发生腐蚀的管线部分受腐蚀 参数影响最大。



图 5 腐蚀管线下应力-应变云图 Fig.5 Stress-strain contours of corrosion pipeline

由表1与图6可以看出,在地震作用下,腐蚀 对管线的应力-应变影响程度从大到小依次为管线 腐蚀位置(管线右侧)、管线底部、管线顶部、管线左 侧。相较于应力应变数值腐蚀对管线的位移影响,

表 l	值	
-----	---	--

Table 1 The monitoring value of each monitoring position under different corrosion depth

腐蚀深度	10%					20%				30%			
拾取位置	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
应力/MPa	23.806	15.527	18.192	10.695	24.652	15.471	18.192	10.679	25.565	15.41 9	18.192	10.661	
应变/(×10-3)	0.114 0	0.074 4	0.087 1	0.051 2	0.118 0	0.074 2	0.087 1	0.051 2	0.127 6	0.073 7	0.087 1	0.051 0	
位移/(×10 <sup>-3</sup> m)	0.938 1	0.785 0	0.772 1	0.562 2	0.946 7	0.784 7	0.772 1	0.562 0	0.955 1	0.784 7	0.772 0	0.561 7	
腐蚀深度		40	%		50%				60%				
拾取位置	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
应力/MPa	26.649	15.371	18.192	10.641	28.134	15.324	18.192	10.615	30.602	15.274	18.191	10.579	
应变/(×10 <sup>-3</sup> )	0.127 6	0.073 7	$0.087\ 1$	0.051 0	0.134 7	0.073 5	$0.087 \ 1$	0.050 9	0.146 5	0.073 2	0.087 1	0.050 7	
位移/(×10 <sup>-3</sup> m)	0.962 9	0.785 1	0.771 9	0.561 4	0.969 3	0.786 0	0.771 7	0.561 0	0.973 2	0.787 7	0.771 5	0.560 5	



图 6 不同腐蚀深度下各监测点应力应变位移曲线

Fig.6 Stress-strain and deformation contours under different corrosion depth

顶部要大于底部,从实际情况分析是符合理论分析 的。且随着腐蚀深度的增加,腐蚀深度对管线腐蚀 横断面的性能影响越来越大。

3.2 腐蚀宽度对管线横断面抗震性能的影响

通过改变 APDL 命令流中模型腐蚀宽度的参数来模拟具有不同腐蚀宽度的含腐蚀缺陷管线。管 线模型的腐蚀深度均为d=0.4t(t)为壁厚),管线腐 蚀宽度分别取 $\beta=15^{\circ},30^{\circ},45^{\circ},60^{\circ},改变图5中管线$ 的腐蚀宽度,研究不同腐蚀宽度条件下地震荷载对管线的影响。 由表 2 与图 7 可以得出,随着腐蚀宽度的增长, 管线的应力和应变逐渐增大,在腐蚀宽度为 0°~14° 出现折线斜率突然递增,而后在 14°~45°时出现下 降的趋势,45°~60°时呈继续增长的趋势。相对于 位移曲线,折线率增长平缓。出现此种情况可知,在 腐蚀宽度较小时,出现应力集中现象,造成曲线突变 的状况,而后随着腐蚀宽度的增大,应力集中现象渐 渐缓解,再随着腐蚀宽度的逐渐增大,曲线呈现出较 平缓的增长趋势。

表 2 不同腐蚀宽度下各监测位置的监测值

Table 2	The monitoring	value of	each	monitoring	position	under	different	corrosion	widt	ł
---------	----------------	----------	------	------------	----------	-------	-----------	-----------	------	---

			<u>ן</u>		15				30					
阀压见及/()	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·					15								
拾取位置	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
应力/MPa	22.958	15.585	18.191	10.709	33.252	15.48	18.192	10.711	26.649	15.371	18.192	10.641		
应变/(×10 <sup>-3</sup> )	0.109 9	0.074 7	0.087 1	0.051 3	0.159 3	0.074 2	0.087 1	0.051 3	0.127 6	0.073 7	0.087 1	0.051		
位移/(×10 <sup>-3</sup> m)	0.929 3	0.785 6	0.772 2	0.562 4	0.982 2	0.784 8	0.772	0.561 7	0.962 9	0.785 1	0.771 9	$0.561 \ 4$		
腐蚀宽度/(°)		4	5					6	0					
拾取位置	1	2	3	4		1		2		3	4			
应力/MPa	26.172	15.198	18.192	10.414	29.	833	15.	427	18.	192	10.	652		
应变/(×10-3)	0.125 3	0.072 9	0.087 1	0.049 9	0.1	0.142 9		0.074		0.087 1		51		
位移/(×10 <sup>-3</sup> m)	0.947 5	0.786 8	0.771 7	0.561 3	0.9	693	0.785 1		0.771 9		0.561 7			



图 7 不同腐蚀宽度下各监测点的应力曲线

Fig.7 Stress-strain and deformation contours under different corrosion width

#### 3.3 腐蚀位置对管线横断面抗震性能的影响

本节主要研究的是管线的腐蚀位置对管线抗震性能的影响,管线模型通过改变腐蚀位置来建立。 本节只研究腐蚀宽度  $\beta = 30^{\circ}$ 、腐蚀深度为壁厚的 40%时,腐蚀位置(分别取管线的右侧、底部和顶部) 随着腐蚀位置的变化对管线抗震性能的影响。

当腐蚀分别发生在三个不同位置时,每种腐蚀

情况下各点的应力、应变如表3所列。可以看出,无 论腐蚀发生在哪个位置,地震作用下管线的最大应 力和应变都发生在腐蚀位置,且应力和应变集中出 现在腐蚀深度最大的腐蚀中心位置。腐蚀中心偏离 管线底部中心,除发生腐蚀的区域外,管线侧壁将受 到较大影响。

Table 3	The monitoring	value of ea	h monitoring	position unde	er different	corrosion	location
---------	----------------	-------------	--------------	---------------	--------------	-----------	----------

腐蚀位置		底	部			右	侧		顶部			
拾取位置	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
应力/MPa	21.142	23.025	15.576	18.196	26.649	15.371	18.192	10.641	23.847	18.417	11.627	22.974
应变/(×10-3)	0.101 5	0.110 2	0.074 7	0.087 1	0.127 6	0.073 7	0.087	10.051	0.114 3	0.088 1	0.055 7	0.11
位移/(×10 <sup>-3</sup> m)	0.511 3	0.930 2	0.786	0.770 9	0.962 9	0.785 1	0.771 9	0.561 4	0.768 5	0.772 6	0.518 2	0.929 4

#### 3.4 腐蚀位置对管线埋深抗震性能的影响

根据管线的不同埋深条件建立管线的腐蚀模型,管线的埋置深度分别为1、2、3、4及5m。通过改变 APDL 命令流中模型的管线埋深参数来模拟, 来研究管线埋深在地震荷载作用下对管线抗震性能的影响。

从表 4 与图 8 可以得知,随着管线埋深越深,管 线受到地震的影响越大,则对管线抗震要求就会越 高;反之,管线埋深较浅时,受到地震作用的影响反 而减小。这是因为管线的埋深不大时,管线周围所 受到的土层压力和摩擦力也会较小,受到的约束减 小,则在地震时管线受到的变形和破坏减小。位移 曲线相对于应力、应变曲线,除腐蚀位置外随着管线 埋深的增加,其他监测点值增长变化明显,说明管线 埋深的增加对管线各部分的影响都很大。

表 4 不同腐蚀管线埋深下各监测位置的监测值

Table 4	The monitoring value of	of eac	h monitoring	position	under	different	corrosion	pipeline	dept	٤h

埋深/m		-	1			:	2		3				
拾取位置	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
应力/MPa	20.896	14.271	17.262	9.483	21.345	14.218	17.262	9.398	24.649	15.456	18.192	9.452	
应变/(×10 <sup>-3</sup> )	0.105 6	0.047 9	0.053 4	0.029 8	0.113 2	0.047 3	0.053 4	0.029 8	0.135 6	0.037 8	0.053 1	0.031	
位移/(×10 <sup>-3</sup> m)	0.732 4	0.542 8	0.537 6	0.325 3	0.763 4	0.543 5	0.542 9	0.561 7	0.876 3	0.834 2	0.792 7	0.648 9	
埋深/m		4	4					:	5				
拾取位置	1	2	3	4		1	2		3		4		
应力/MPa	26.649	15.371	18.192	10.641	31.	565	17.	542	19.	478	11.483		
应变/(×10-3)	0.127 6	0.073 7	0.087 1	0.051	0.142 9		0.079		0.096 3		0.089 0		
位移/(×10 <sup>-3</sup> m)	0.962 9	0.785 1	0.771 9	0.561 4	1.24	48 6	1.035 6		0.787 6		0.746 2		





## 4 结语

本文通过分析管线的腐蚀参数对含腐蚀缺陷管 线抗震性能的影响,并通过反应位移法加载地震荷 载在管线上得出结论:

(1)对于不含腐蚀的管线,管线的最大应力发 生在管线底部,其余各处应力值差异不大;

(2)管线的最大应力发生在管线的腐蚀中心 位置;

(3)腐蚀对管线的应力影响随着距腐蚀中心距 离的增大而减小,当腐蚀宽度<15°时,由于应力集 中现象的影响,均出现最大应力应变;

(4) 地震对管线的作用影响与管线的埋设深度 成反比的趋势,对于含有腐蚀缺陷的管线,地震作用 时管线的最大内力会出现在腐蚀段位置,在该位置 管线非常容易受到破坏。分析结果表明在地震荷载 作用下,含腐蚀缺陷的管线的抗震性能受到很大影 响,在管线抗震设计中要着重考虑在管线服役期间 腐蚀对管线结构与失稳破坏的影响。因此,在管线 工程建设中要将防震和防腐措施考虑进去。

#### 参考文献(References)

[1] 李杰.生命线工程抗震-基础理论与应用[M].北京:科学出版 社,2005.

LI Jie.Basic Theory and Application of the Lifeline Engineering Anti-seismic[M].Beijing:Science Press,2005.(in Chinese)

 [2] 赵庆华.鲁宁输油管道腐蚀调查分析与对策[J].腐蚀与防护, 2002,23(3):128-130.
 ZHAO Qing-hua.Investigation and Counter Measures for Cor-

rosion of LuNing oil Pipeline [J]. Corrosion & Protection, 2002,23(3):128-130.(in Chinese)

- [3] 王晓华,卫月琴,朱红卫,等.煤气管道的电化学腐蚀与防腐蚀 措施浅析[J].煤化工,2001,95(2):39-40.
  WANG Xiao-hua,WEI Yue-qin,ZHU Hong-wei, et al. A Preliminary Analysis on Electrochemistry Corrosion and Anti-corrosion Measures of Coal Pipes[J]. Coal Chemical Industry, 2001,95(2):39-40.(in Chinese)
- [4] 刘威,李杰.考虑随机腐蚀作用的埋地管线地震反应分析[J]. 土木工程学报,2007,40(2):104-108.
   LIU Wei,LI Jie.Seismic Response Analysis of Buried Pipelines with Stochastic Corrosions[J]. China Civil Engineer Journal 2007,40(2):104-108.(in Chinese)
- [5] Shiro Takada, Liang Jian-Wen, Li Teng-yan. Shell-Model Response of Buried Pipe Lines to Large Fault Movements[J]. Journal of Structural Engineering JSCE, 1998:44.
- [6] 赵林,冯启民.埋地管线有限元建模方法研究[J].地震工程与 工程振动,2001,21(2):53-57.
   ZHAO Lin,FENG Qi-min.Research on Methods for Establis-

hing FEM Model of Buried Pipelines[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(2): 53-57.(in Chinese)

- [7] 蔡文军,陈国明,潘东民,等.腐蚀管线剩余强度评估的研究进展[J].石油机械,1999,27(11):47-49.
  CAI Wen-jun, CHEN Guo-min, PAN Dong-min, et al. Advances in Research of Residual Strength Assessment of Corroded Pipeline[J].China Petroleum Machinery,1999,27(11): 47-49.(in Chinese)
- [8] Newmark N M, Hall W J.Pipeline Design to Resist Large Fault Displacement[C]//Proc of US Conf on Earthquake Eng Oakland: EERI.1975:416-425.
- [9] 潘昌实.隧道及地下结构物抗震问题的研究概况[J].世界隧道,1996(5):7-16.
   PAN Chang-shi.Study on the Seismic Problem of Tunnel and Underground Structures[J].World Tunnel,1996(5):7-16.(in Chinese)
- [10] 王桂萱,陆旭华,赵杰,等.基于反应位移法的现浇钢筋混凝土 地下沟道抗震分析[J].世界地震工程,2012,28(4):28-35.
   WANG Gui-xuan, LU Xu-hua, ZHAO Jie, et al. Seismic Analysis of Grouting-in-place Reinforced Concrete Underground Channel Based on Response Displacement Method[J].
   World Earthquake Engineering, 2012, 28(4): 28-35. (in Chinese)
- [11] 耿萍,张景,何川,等.隧道横断面反应位移法基本原理及其应用[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):3478-3485.
   GEN Ping, ZHANG Jing, HE Chuan, et al. Basic Theory of Seismic Deformation Method in Cross Section of Tunnel and Its Application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(2):3478-3485.(in Chinese)
- [12] 陈严飞,李昕,周晶.组合荷载作用下腐蚀缺陷管道的极限承载力[J].计算力学学报,2011,28(1):132-139.
  CHEN Yan-fei,LI Xi,ZHOU Jing.Ultimate Flexural Capacity of Pipe with Corrosion Defects Subject to Combined Load-ings[J].Chinese Journal of Computation Mechanics,2011,28 (1):132-139.(in Chinese)
- [13] 王海秋,张昌兴,李双林,等.油气管道腐蚀失效概率及预测模型[J].油气田地面工程,2007,8(4):31-33.
  WANG Hai-qiu,ZHANG Chang-lin,LI Shuang-lin, et al.Oil and Gas Pipeline Corrosion Failure Probability and the Prediction Model[J].OIL-Gasfield Surface Engineering,2007,8(4): 31-33.(in Chinese)
- [14] Corona E, Lee L H, Kyriakides S, Yield Anisotropy Effects on Buckling of Circular Tube Under Bending [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(22/23):7099-7118.
- [15] 卢芳琴,孙红,石玉成.砂土液化引起大位移对地下管道影响的非线性分析[J].地震工程学报,2015,37(2):362-366. LU Fang-qin,SUN Hong,SHI Yu-cheng.Nonlinear Analysis of Influence of Large Displacement Induced by Sand Liquefaction on Underground Pipeline[J].China Earthquake Engineering Journal,2015,37(2):362-366.(in Chinese)