

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201902035

## 考虑随机腐蚀的多龄期埋地钢管地震响应规律\*

郑山锁<sup>1,2</sup>, 谢孝奎<sup>1,2</sup>, 董淑卿<sup>3</sup>, 贺金川<sup>4</sup>, 郑 昊<sup>1,2</sup>, 龙 立<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 陕西省电力设计院有限公司, 陕西 西安 710054; 4. 西安建筑科技大学设计研究院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 埋地管线作为城市水、气等的重要传输载体, 对城市正常功能的运行发挥着不可或缺的作用, 由于土壤环境腐蚀的影响, 在突发地震作用下极易发生破坏, 造成环境污染及资源的浪费。基于随机腐蚀过程, 针对多龄期埋地钢管的地震响应规律展开了系统深入的研究: 考虑埋地管线腐蚀发生的随机性, 建立了基于齐次马尔可夫过程的随机腐蚀发生模型; 考虑不同腐蚀环境的影响, 建立了酸性环境下的全面腐蚀模型与近中性及碱性环境下的局部腐蚀模型; 基于钢材标准试件的加速腐蚀模拟及拉伸破坏试验, 建立了考虑随机腐蚀作用的钢材力学性能退化模型及埋地钢管的时变本构模型; 采用有限元软件 ANSYS 进行非线性动力时程分析, 揭示了不同土壤环境下多龄期埋地钢管的地震响应规律, 为埋地钢管的震前加固及震后破坏评价提供理论依据。

**关键词:** 随机腐蚀; 齐次马尔可夫过程; 多龄期; 埋地钢管; 地震响应规律

**中图分类号:** TU990.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0255-10

## Study on Seismic Response Law of Multi-Age Buried Steel Pipes Considering Random Corrosion

ZHENG Shansuo<sup>1,2</sup>, XIE Xiaokui<sup>1,2</sup>, DONG Shuqing<sup>3</sup>, HE Jinchuan<sup>4</sup>, ZHENG Hao<sup>1,2</sup>, LONG Li<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education (XAUAT), Xi'an 710055, China; 3. Shaanxi Electric Power Design Institute Co., Ltd, Xi'an 710054, China; 4. Architectural Design and Research Institute, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** As an important carrier of urban water and gas transmission, buried pipelines play an indispensable role in the normal operation of cities. Due to the impact of soil environmental corrosion, buried pipelines can be easily destroyed under sudden earthquakes, resulting in environmental pollution and waste of resources. In this paper, on the basis of the stochastic corrosion process, a systematical research was conducted to study the seismic response law of multi-aged buried steel pipes. Considering the randomness of buried pipeline corrosion, a stochastic corrosion occurrence model based on homogeneous Markov process was established. According to the influences of different corrosion environments, a comprehensive corrosion model in an acidic environment and a local corrosion model in near-neutral and alkaline environments were established. Based on the accelerated corrosion and tensile tests of steel standard specimens, a Mechanical Property Deterioration Model of steel and a time-vary-

\* 收稿日期: 2019-02-22; 修回日期: 2019-03-29

基金项目: 国家重点研发计划课题(2019YFC1509302)、陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF06-10)、西安市科技计划项目(2019113813CXSF016SF026)资助

作者简介: 郑山锁(1960—), 男, 教授, 博导。主要从事结构工程与抗震工程方面的研究。E-mail: zhengshansuo@263.net

ing constitutive model of buried steel pipe were established and they both incorporated the stochastic corrosion effects. Then the nonlinear dynamic time-history analysis was conducted on buried steel pipe by using the finite element software ANSYS. And the seismic response law of multi-age buried steel pipe under different soil environments was revealed, which provided a theoretical basis for the pre-earthquake reinforcement and post-earthquake damage evaluation of buried steel pipe.

**Keywords:** random corrosion; homogeneous Markov process; multi-age; buried steel pipe; seismic response law

## 引言

供水/供气系统作为城市主要的生命线分支之一,对于维持城市功能的正常运转发挥着重要作用。由于地质环境复杂,埋地管线不可避免的会出现不同程度的腐蚀,且随着服役龄期的不断增长,腐蚀不断加重,导致其力学与抗震性能不断退化,在近几十年发生的多次破坏性地震中,无一例外的遭到严重破坏。目前,我国处于地震多发期,大多数城市的供水/供气管网系统目前处于不同程度的老化状态,抗震韧性不足,故针对多龄期腐蚀钢管展开地震响应规律分析,对其抗震性能评价及震后修复加固意义重大。

国内外学者针对埋地管线的腐蚀问题及地震响应规律展开了大量研究,邵煜等<sup>[1]</sup>综合考虑管线受力特征及腐蚀规律,针对埋地管线在外部荷载和腐蚀耦合作用下的失效问题展开了研究,并建立了均匀腐蚀失效力学模型;王桂萱等<sup>[2]</sup>采用反应位移法对埋地腐蚀管线进行抗震分析,研究了管线腐蚀深度、宽度、位置、埋深等因素对管线抗震性能的影响;王海涛等<sup>[3]</sup>以城市埋地管道实测腐蚀缺陷为依据,基于有限元软件 ANSYS 研究了不同腐蚀缺陷对管道应力应变的影响规律;程志远等<sup>[4]</sup>基于埋地管道抗震规范计算方法,考虑管土之间的弹塑性滑移,推导了埋地管道最大地震反应的解析表达式,并对城市地下供水管道进行了地震反应分析;M. Ahammed 等<sup>[5]</sup>应用可靠度理论,考虑管体材料和土壤特性、内外部荷载及腐蚀参数等因素提出了埋地腐蚀管线的可靠性评估方法;A. Valor 等<sup>[6]</sup>采用马尔可夫链模型提出了两种不同的点腐蚀模型,并试验验证了模型的合理性;A. Amirat 等<sup>[7]</sup>考虑腐蚀及残余应力对管道失效的影响,对地下管线进行了可靠性分析。

然而埋地管线在不同土壤环境下的腐蚀问题存在差异,且服役龄期对管线的力学与抗震性能退

化影响显著。本文首先建立了不同腐蚀环境下埋地钢管的腐蚀模型,通过钢材腐蚀模拟试验建立了腐蚀钢材的力学退化模型,进而建立了考虑随机腐蚀过程的多龄期埋地钢管的时变本构模型,在此基础上,通过有限元分析揭示了不同土壤环境下多龄期埋地钢管的地震响应规律。

## 1 齐次马尔可夫随机过程

马尔可夫过程<sup>[8]</sup>是研究离散事件动态系统状态空间的重要方法,系描述事物状态随机转移及变化的有效数学工具,相关定义与性质如下:

**定义 1** 设随机过程  $\{X(t), t \geq 0\}$ , 状态空间为  $E = \{0, 1, 2, \dots\}$ 。若对  $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < t_{n+1}$  及非负整数  $i_1, i_2, \dots, i_n, i_{n+1}$ , 有

$$P\{X(t_{n+1})=i_{n+1} | X(t_1)=i_1, X(t_2)=i_2, \dots, X(t_n)=i_n\} = P\{X(t_{n+1})=i_{n+1} | X(t_n)=i_n\} \quad (1)$$

即马尔可夫性成立,则称  $\{X(t), t \geq 0\}$  为连续参数马尔可夫链。

**定义 2** 设  $\{X(t), t \geq 0\}$  为连续参数马氏链,对任意  $i, j \in E$ , 任意的非负实数  $s, t$ , 条件概率

$$p_{ij}(s, t) = P\{X(t+s)=j | X(s)=i\} \quad (2)$$

称为马氏链的转移概率函数,显然

$$0 \leq p_{ij}(s, t) \leq 1, \sum_{j \in E} p_{ij}(s, t) = 1 \quad (3)$$

称  $p(s, t) = (p_{ij}(s, t))_{i, j \in E}$  为马氏链的转移矩阵。

**性质 1** 设  $\{X(t), t \geq 0\}$  为连续参数齐次马氏链,当  $q_i < +\infty, \sum_{j \in E} q_{ij} = q_i$  时,满足科尔莫戈罗夫前进微分方程

$$\frac{dp_{ij}(t)}{dt} = -q_i p_{ij}(t) + \sum_{\substack{k \in E \\ k \neq i}} q_{ik} p_{kj}(t) \quad (4)$$

即:

$$p'(t) = QP(t) \quad (5)$$

## 2 基于随机腐蚀过程的管线腐蚀模型

### 2.1 基于齐次马尔可夫过程的随机腐蚀发生模型

由于地质环境的不同,影响管线腐蚀的因素较多,且存在电化学腐蚀、微生物腐蚀、化学腐蚀等多种腐蚀过程,其机理十分复杂,致使管线腐蚀的发生具有随机性,无法简单的采用确定性规律来描述。

近年来,诸多学者将马尔可夫过程引入到地下管线腐蚀的相关研究,取得了一系列新进展:F.Bolzononi等<sup>[9]</sup>采用连续时间下的三态马尔可夫过程建立了局部腐蚀的腐蚀模型;S.A.Timashev等<sup>[10]</sup>利用连续时间、离散状态下的马尔可夫过程描述由于随机腐蚀的增长而引起的金属损失,进而进行管道失效概率的评估及管道运行维护的优化;刘威等<sup>[11]</sup>利用齐次马尔可夫过程模拟管线的腐蚀,推导出管线面积腐蚀率随服役时间变化的概率密度函数,并采用随机摄动理论分析了腐蚀管线在地震激励下的位移和应力反应均值和方差;袁庚等<sup>[12]</sup>应用马尔可夫链理论进行了埋地燃气钢管管壁的腐蚀预测。

综上,本文采用齐次马尔可夫过程模拟地下管线的随机腐蚀,将管线的状态划分为腐蚀状态及未腐蚀状态,设管线的状态空间  $E=(1,2)$ ,1为未腐蚀状态,2为腐蚀状态,则管线状态转移矩阵  $P$  及状态转移速度矩阵  $Q$  为:

$$\begin{cases} P(\Delta t) = (p_{ij}(\Delta t)) \\ Q = (q_{ij}) \end{cases} \quad (i, j \in 1, 2) \quad (6)$$

其中,  $p_{ij}(\Delta t)$  为在  $\Delta t$  时间内,由状态  $i$  转移到状态  $j$  的概率;  $q_{ij}$  为管线在  $\Delta t$  时间内由未腐蚀状态转变为腐蚀状态的转移速率。

根据齐次马尔可夫定义,有:

$$\sum_{j \in E} p_{ij}(s, t) = 1, \text{ 即 } \begin{cases} p_{11}(\Delta t) + p_{12}(\Delta t) = 1 \\ p_{21}(\Delta t) + p_{22}(\Delta t) = 1 \end{cases}$$

则有

$$\begin{cases} q_{11} + q_{12} = 0 \\ q_{21} + q_{22} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

假设最初状态管线未发生腐蚀,由于管线的腐蚀为不可逆过程,当管道发生腐蚀后无法再转移到未腐蚀状态,则  $q_{21}$  为 0。设由未腐蚀状态转移到腐蚀状态的概率为  $q$ ,根据齐次马尔可夫性质可得状

态转移速度矩阵为:

$$Q = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -q & q \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

结合式(5)、(6)、(8)及初始条件

$$\begin{cases} P_{ij}(0) = 1 & i = 0, 1 \\ P_{ij}(0) = 0 & i, j = 0, 1, i \neq j \end{cases}$$

解得管线在  $t$  时刻处于腐蚀状态的概率为  $e^{-qt}$ 。

设管线腐蚀发生时刻为  $t$  的概率为  $P(t)$ ,即管线在  $t$  时刻处于未腐蚀状态,且在  $dt$  时间内转变为腐蚀状态,则:

$$P(t) = e^{-qt} q dt \quad (9)$$

### 2.2 酸性土壤环境下的全面腐蚀模型

土壤的酸碱性是影响金属材料在土壤腐蚀介质中耐腐性的重要因素,黄涛等<sup>[13]</sup>通过土壤加速腐蚀模拟试验,研究了不同 pH 对钢材腐蚀行为的影响,发现随着 pH 的升高,腐蚀速率持续下降,并由较为严重的全面腐蚀转变为局部腐蚀,文献[14—15]也同样得出金属材料的腐蚀速率随着土壤 pH 的升高而下降的结论。酸性土壤环境下,管线以析氢腐蚀为主,腐蚀速率较快,管道腐蚀较为严重,且随着服役龄期的增加而不断加重。由于腐蚀分布于埋地管道整个表面,且腐蚀深度较为均匀,故假设酸性土壤环境下管线的腐蚀为均匀腐蚀,腐蚀发展模型为线性发展模型<sup>[16]</sup>,由于管道厚度有限,不可能沿其深度方向无限腐蚀,当腐蚀深度达到壁厚时,此时腐蚀面积达到最大,当腐蚀深度小于壁厚时,管线截面腐蚀面积  $A_1$  为:

$$A_1 = \pi D v_d (T - t) \quad (10)$$

式中,  $D$  为管线直径(mm);  $v_d$  为管线在深度方向的腐蚀速率(mm/a),按文献[13]取值;  $T$  为管线服役时间(年);  $t$  为腐蚀发生时刻。

定义管道面积腐蚀率  $\eta$  为截面腐蚀面积  $A_1$  与管线完好时的截面面积  $A_0$  之比,则管道面积腐蚀率为:

$$\eta = \frac{\pi D v_d (T - t)}{A_0} = \frac{\pi D v_d (T - t)}{\pi D d} = \frac{v_d (T - t)}{d} \quad (11)$$

式中,  $d$  为管壁厚度(mm);其他参数如前文所述。

由于埋地管线周围土壤环境的不同,且影响腐蚀的因素复杂,管道腐蚀的发生具有随机性,故设服役龄期  $T$  内管线腐蚀率  $\eta < x$  的条件概率为  $P(\eta < x)$ ,则管道在服役龄期  $T$  内发生腐蚀的全概

率公式为:

$$P(\eta < x) = \int_0^T P(\eta < x | t) P(t) \quad (12)$$

则随机变量  $\eta$  的概率密度函数  $f_\eta(x)$  为:

$$f_\eta(x) = \int_0^T f_\eta(x | t) P(t) \quad (13)$$

当腐蚀发生时间  $t$  已知时, 面积腐蚀率  $\eta$  为确定值, 为计算腐蚀率的概率密度函数, 引入狄克拉函数  $\delta(\cdot)$ , 则有:

$$f_\eta(x) = \int_0^T \delta\left(x - \frac{v_d(T-t)}{d}\right) e^{-qt} q dt \quad (14)$$

根据狄克拉函数的挑选性, 求得面积腐蚀率  $\eta$  的概率密度函数为:

$$f_\eta(x) = \frac{d}{v_d} q e^{-q(T-xd/v_d)} \quad (15)$$

设考虑随机腐蚀过程的酸性土壤环境下埋地管线在均值意义上的腐蚀率为  $E(\eta)$ , 则根据随机变量均值的定义, 有:

$$E(\eta) = E(\eta(t)) = \int_0^T \eta(t) e^{-qt} \cdot q dt = \int_0^T \frac{v_d(T-t)}{d} e^{-qt} \cdot q dt \quad (16)$$

即为:

$$\begin{cases} E(\eta) = \frac{T}{M} - \frac{1}{qM} + \frac{1}{qM} e^{-qT} \\ M = d/v_d \end{cases} \quad (17)$$

式中, 相关参数如前文所述。

### 2.3 近中性及碱性土壤环境下的局部腐蚀模型

在中性及碱性土壤环境下, 氧气参与阴极的去极化过程, 使得埋地钢管发生吸氧腐蚀, 土壤空隙率、含水率以及电阻率等都会对腐蚀速率产生影响, 其中电阻率对管线腐蚀影响较大。当土壤电阻率增大时, 联系钢材表面阴极区与阳极区的液膜变薄, 使得其导电性能变差, 从而降低了管线腐蚀速率, 李海坤等<sup>[17]</sup>根据国内外 127 个管线腐蚀速率与当地土壤电阻率的数据, 建立了管线自腐蚀速率与土壤电阻率的关系, 发现在近中性及碱性土壤环境中, 管线钢自腐蚀速率与当地土壤电阻率的对数近似成反比关系。由于在中性及碱性土壤环境下, 管线腐蚀速率较慢, 碱性腐蚀介质抑制腐蚀的扩张, 从而管线腐蚀程度相对较轻, 同时腐蚀一般发生在某一相对集中区域, 故假定该类环境下的管线腐蚀为局部腐蚀。

埋地钢管在中性及碱性土壤环境下发生的局

部腐蚀具有时间、位置及形状的多重随机性, 且不同腐蚀点之间存在一定的相关性, 导致埋地管线的腐蚀问题变得更加复杂, 国内外针对多点腐蚀及群腐蚀等问题展开了大量研究, 得出了一些有益结论。本文在国内外研究的基础上, 将埋地管线的群腐蚀问题简化为多点局部腐蚀, 假设管道腐蚀同时发生在管道截面 4 个方向, 且相互独立发展, 通过大量局部腐蚀缺陷尺寸的分析发现, 在缺陷深度剖面上呈两端浅中间深, 并且缺陷过渡比较平滑, 故假设局部腐蚀的缺陷深度剖面形状为抛物线型<sup>[18]</sup>, 则管道截面腐蚀面积为:

$$A_2 = 4 \times \frac{2}{3} v_d v_b (T-t)^2 = \frac{8}{3} v_d v_b (T-t)^2 \quad (18)$$

式中,  $v_d$ 、 $v_b$  分别为管线在深度及径向宽度方向的腐蚀速率 (mm/a), 按文献[13]取值。

则近中性及碱性腐蚀环境下埋地管道的截面腐蚀率为:

$$\gamma = \frac{8v_d v_b (T-t)^2}{3\pi D d} \quad (19)$$

与式(14)类似, 通过引入狄克拉函数可得局部腐蚀面积腐蚀率的概率密度函数为:

$$f_\gamma(x) = \int_0^T \delta\left(x - \frac{8}{3} \frac{v_d v_b (T-t)^2}{\pi D d}\right) e^{-qt} q dt \quad (20)$$

根据狄克拉函数的挑选性解式(19)可得:

$$f_\gamma(x) = \frac{1}{2} N q x^{-0.5} e^{-q(T-Nx^{0.5})} \quad (21)$$

则考虑随机腐蚀过程的近中性及碱性土壤环境下埋地管线腐蚀率的均值  $E(\gamma)$  为:

$$E(\gamma) = E(\gamma(t)) = \int_0^T \gamma(t) e^{-qt} \cdot q dt = \int_0^T \frac{8v_d v_b (T-t)^2}{3\pi D d} e^{-qt} \cdot q dt \quad (22)$$

从而:

$$\begin{cases} E(\gamma) = \frac{T^2}{N^2} - \frac{2T}{qN^2} + \frac{2}{q^2 N^2} - \frac{2}{q^2 N^2} e^{-qT} \\ N = \sqrt{\frac{3\pi D d}{8v_b v_d}} \end{cases} \quad (23)$$

式中, 相关参数如前文所述。

## 3 多龄期埋地钢管的地震响应规律

### 3.1 考虑腐蚀作用的钢材力学性能退化模型

地下土壤环境复杂, 易造成埋地钢管发生腐蚀, 不同环境下的腐蚀机理及腐蚀程度也各不相同, 随着结构服役龄期的增长, 由于持续不断腐蚀,

往往会降低结构材料的力学性能,且腐蚀越严重,其材料力学性能退化越重,进而导致埋地钢管抗震性能不断劣化。研究表明,钢材的力学性能与失重率呈线性相关关系,史炜洲等<sup>[19]</sup>基于腐蚀钢材力学性能试验,利用最小二乘法对试验结果进行线性回归,得到了钢材各力学性能参数与其失重率之间的关系。

为建立多龄期埋地管线考虑腐蚀作用的钢材力学性能退化模型,本文根据国家标准<sup>[20]</sup>,选取钢材为 Q235B,厚度为 6、6.5、8、9 及 14 mm 的共 105 个(每种厚度 21 个,且每 3 个一组)钢材标准材性试件,在人工气候模拟实验室进行加速腐蚀模拟试验。依据标准<sup>[21]</sup>进行酸性盐雾试验溶液的配制,进而模拟干湿循环 180 次,每次循环为 8 h(酸性盐雾 2 h、干

燥 4 h 及湿润 2 h)<sup>[22]</sup>。以失重率为钢材腐蚀程度的评价指标,对腐蚀完成的试件,除锈后烘干并测定钢材失重率,其根据式(24)进行计算:

$$D_w = (W_0 - W_1) / W_0 \quad (24)$$

式中,  $W_0$ 、 $W_1$  分别为锈蚀前、后钢材材性试件的质量(g)。

进而采用万能试验机对腐蚀试件进行单向拉伸破坏试验(图 1),采用 DH3818 静态应变仪作为应变采集器,以  $10(\text{N}\cdot\text{mm}^2)/\text{s}$  的应力速率进行拉伸试验。通过对试验数据进行拟合,得到了锈蚀 Q235B 钢材屈服强度  $f_y$ 、极限强度  $f_u$ 、伸长率  $\delta$  和弹性模量  $E$  等力学性能指标与其失重率之间的关系,如图 2 所示。



图 1 腐蚀试件的单向拉伸试验

Fig.1 Unidirectional tensile test of corroded specimens

回归曲线的表达式为:

$$\left. \begin{aligned} f_y'/f_y &= 1 - 0.767D_w \\ f_u'/f_u &= 1 - 0.842D_w \\ \delta'/\delta &= 1 - 1.363D_w \\ E_s'/E_s &= 1 - 0.932D_w \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式中,  $f_y$ 、 $f_u$ 、 $\delta$ 、 $E$  分别为钢材腐蚀前的屈服强度、极限强度、伸长率与弹性模量;  $f_y'$ 、 $f_u'$ 、 $\delta'$ 、 $E'$  分别为钢材腐蚀后的极限强度、极限强度、伸长率与弹性模量。

为了检验本文通过试验数据回归得到的锈蚀钢材退化关系的合理性,依据相关性系数  $R$  进行显著性检验,显示结果见表 1。可以看出,所建立的回归公式线性关系显著,可客观反映锈蚀钢材的力学性能退化。

假设:①沿管线长度方向不同截面的腐蚀率相同;②腐蚀前后钢材的密度没有变化,即  $\rho_0 = \rho_t$ ;③锈蚀仅发生在截面深度及径向方向,而长度方向没有锈蚀损失,即  $L_0 = L_t$ 。基于上述假设,则失重

表 1 回归公式显著性检验

Table 1 Significance test of regression formulas

拟合公式	$R^2$	临界值 $R_{0.01}(1, n-2)$
$f_y'/f_y = 1 - 0.767D_w$	0.908	0.418
$f_u'/f_u = 1 - 0.842D_w$	0.936	0.936
$\delta'/\delta = 1 - 1.363D_w$	0.883	0.883
$E_s'/E_s = 1 - 0.932D_w$	0.836	0.836

率  $D_w$  为:

$$D_w = \frac{\rho_t A_t L_t}{\rho_0 A_0 L_0} = \frac{A_t}{A_0} \quad (26)$$

式中,  $A_0$ 、 $A_t$  分别为截面面积及截面腐蚀面积;  $\rho_0$ 、 $\rho_t$  为腐蚀前后的钢材密度;  $L_0$ 、 $L_t$  为腐蚀前后的管道长度。

结合式(17)与式(26),可得到酸性土壤腐蚀环境下的失重率与服役龄期之间的关系:

$$D_w = E(\eta) = \frac{T}{M} - \frac{1}{qM} + \frac{1}{qM} e^{-qT} \quad (27)$$

结合式(23)与式(26),可得到近中性及碱性土

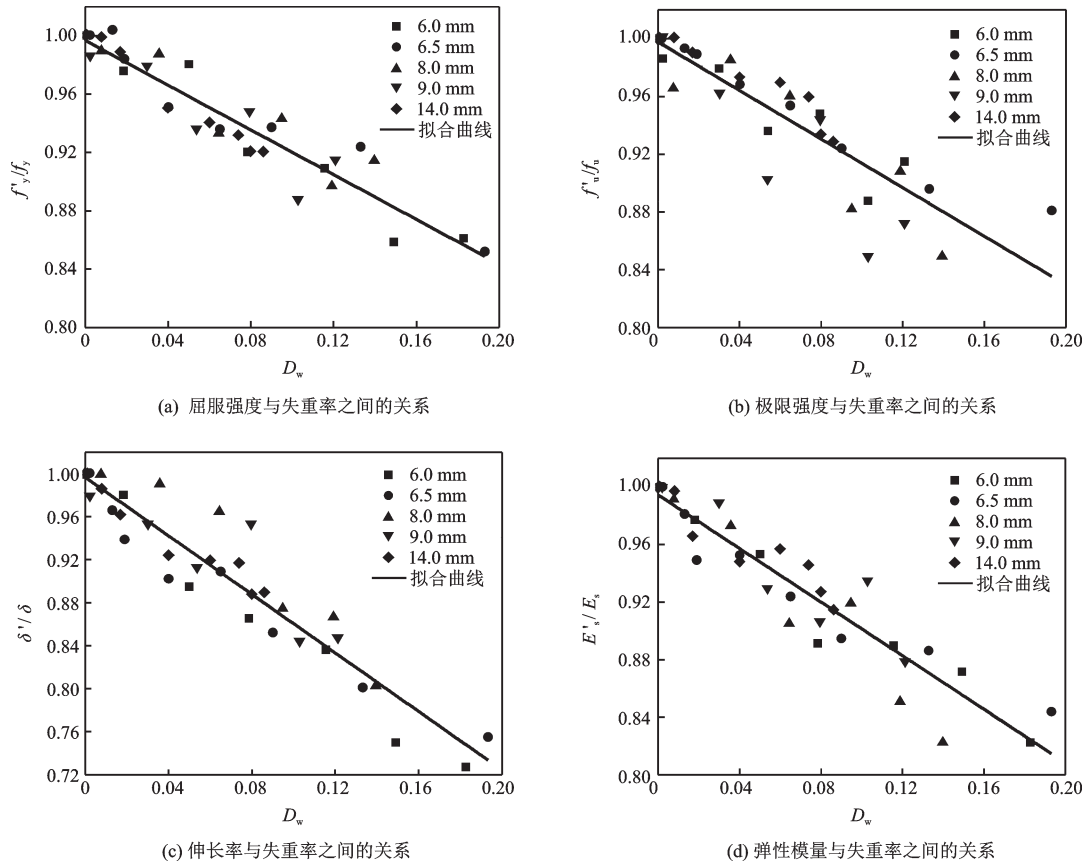


图2 钢材力学性能指标与失重率的回归关系

Fig.2 Regression relationship between mechanical properties and weightlessness rate of steel

壤腐蚀环境下的失重率与服役龄期之间的关系:

$$D_w = E(\gamma) = \frac{T^2}{N^2} - \frac{2T}{qN^2} + \frac{2}{q^2N^2} - \frac{2}{q^2N^2} e^{-qT} \quad (28)$$

将式(27)、式(28)分别代入式(25),可得到不同腐蚀环境下钢材各力学性能指标与服役龄期之间的关系。

### 3.2 有限元分析模型的建立

运用有限元软件 ANSYS 对不同侵蚀环境下多龄期埋地钢管进行数值分析,钢材型号选用 X65 型钢,本构模型采用 Von.Mises 屈服准则和考虑强化的双折线本构模型;针对多龄期管道不同土壤环境侵蚀作用的影响,建模时仅考虑由腐蚀造成的材料“名义”力学性能的降低,而有限元模型截面尺寸不变。

管道及相关环境参数为:管道直径  $D=500$  mm,壁厚  $d=20$  mm,埋深为 1.5 m,管材密度为  $7800 \text{ kg/m}^3$ ,泊松比为 0.3,服役龄期为 20 年。管线

为一连续直管,其计算长度取直径的 30 倍即(15 m)。酸性土壤环境( $\text{pH}=5.5$ )下,沿管道厚度方向腐蚀速率  $v_d=0.42 \text{ mm/a}$ ,碱性环境( $\text{pH}=8.5$ )下,沿管道厚度方向腐蚀速率  $v_d=0.20 \text{ mm/a}$ ,沿管道径向宽度方向腐蚀速率  $v_b=10 \text{ mm/a}$ <sup>[13]</sup>,状态转移率  $q=0.2$ 。假设管线埋设于亚黏土中,且位于 8 度设防区,土容重为  $18 \text{ kN/m}^3$ ,土体的屈服位移取  $0.0075 \text{ m}$ 。结合式(25)、式(27)和式(28),即可得到不同土壤环境腐蚀作用下多龄期埋地钢管钢材的力学性能参数。因篇幅所限,表 2 仅给出了服役龄期为 20 年钢材的力学性能参数,其本构关系如图 3 所示。不同龄期下钢材的弹性模量如图 4 所示。

建模中,管土相互作用及土体材料的非线性考虑:管体采用壳单元,同时将土体简化为沿轴向、竖向及横向三个方向的均布弹塑性弹簧,连接在各个有限单元节点上,模拟土体各个方向对埋地管道的约束作用,并在端部引入等效弹簧边界<sup>[23]</sup>。分析中,采用图 5 所示等效土弹簧及管道单元等效弹簧边界本构模型<sup>[24]</sup>。

表 2 服役 20 年钢材的力学性能参数

Table 2 Mechanical properties of steel after 20 years of service

性能参数	$D_w$	$E_1/\text{MPa}$	$\epsilon_1$	$\sigma_1/\text{MPa}$	$E_2/\text{MPa}$	$\epsilon_2$	$\sigma_2/\text{MPa}$	$\epsilon_m$
未退化	0	210 000	0.002 3	483.00	1 512.0	0.040 0	540.00	0.145 0
酸性土壤环境	0.367 5	147 972	0.002 5	365.59	1 065.4	0.030 9	395.90	0.082 4
碱性土壤环境	0.042 3	201 720	0.002 3	467.33	1 452.4	0.039 1	520.76	0.136 6

注： $D_w$ 为失重率； $E_1$ 、 $E_2$ 分别为管道材料应力—应变简化折线中弹性区、弹塑性区的材料模量； $\sigma_1$ 、 $\epsilon_1$ 分别为管道材料应力—应变简化折线中弹塑性变形起点处的应力、应变； $\sigma_2$ 、 $\epsilon_2$ 分别为管道材料应力—应变简化折线中弹塑性区与塑性区交点处的应力、应变； $\epsilon_m$ 为管道材料的极限拉伸应变

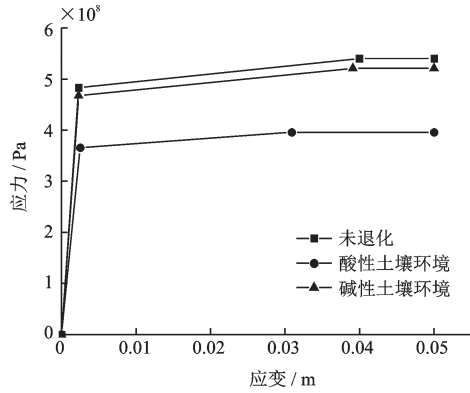


图 3 服役 20 年钢管的退化本构

Fig.3 Degradation constitutive model of steel pipe after 20 years

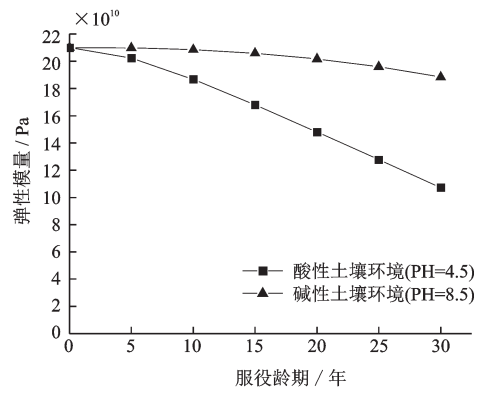
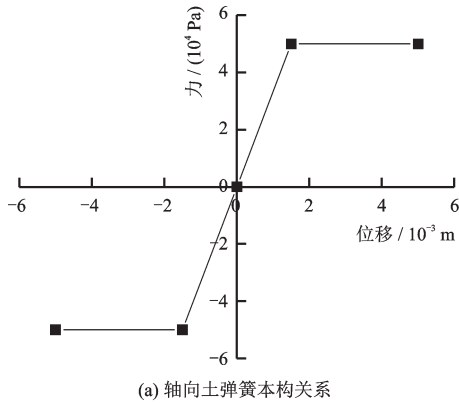
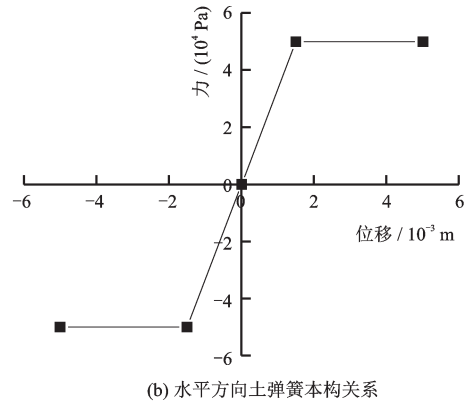


图 4 不同服役龄期下钢材的弹性模量

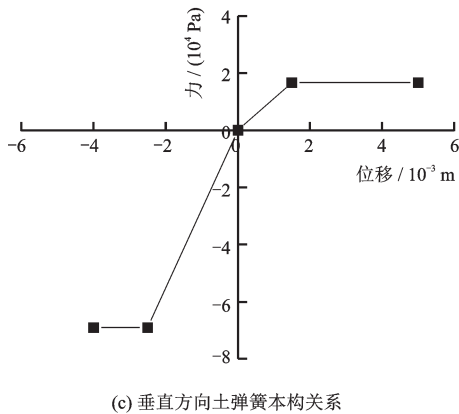
Fig.4 Elastic modulus of steel at different service ages



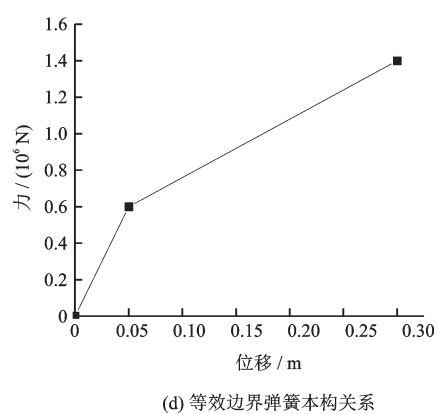
(a) 轴向土弹簧本构关系



(b) 水平方向土弹簧本构关系



(c) 垂直方向土弹簧本构关系



(d) 等效边界弹簧本构关系

图 5 等效弹簧的非线性本构模型

Fig.5 Nonlinear constitutive model of equivalent spring

### 3.3 埋地钢管地震反应分析

基于上述建模,对不同土壤腐蚀环境下服役期为0、5、10、15、20、25及30年的埋地管道分别进行地震动响应分析。考虑地震动的随机性,根据ATC—63(2008)报告<sup>[25]</sup>中的选波规则,从ATC—63选取5条地震波(见表3)及2条人工波,将最大加速度幅值调幅到0.4g,进行动力时程分析。

酸性土壤环境(pH=5.5)及碱性土壤环境(pH=8.5)下,不同服役龄期管道的地震动响应规律分别如图6和图7所示。

由图可以看出,不同环境下埋地钢管在地震作用下的总位移最大值及轴向最大应变均随着服役龄期的增长而呈线性增长趋势。对分析数据进行线性拟合,得到其回归公式见表4。采用相关系数R检验法进行显著性检验,其线性关系显著,验证了拟合公式的科学性和准确性,可揭示不同龄期下埋地钢管的地震动响应规律。

由表4可知,不同环境下钢管抗震性能退化规律存在明显差异,酸性土壤环境(pH=5.5)下埋地钢管总位移及轴向最大应变响应随龄期的变化率分别为碱性土壤环境下的2.4倍和2.6倍。在酸性土壤腐蚀环境条件下,管线腐蚀速率较快,且为全面腐蚀;随着服役龄期的增加,材料强度显著折减,进而引起抗震性能快速退化。酸性环境服役龄期为30年时,其材料强度折减约50%,埋地钢管总位移及轴向最大应变分别扩大约3.4倍和2.8倍,其抗

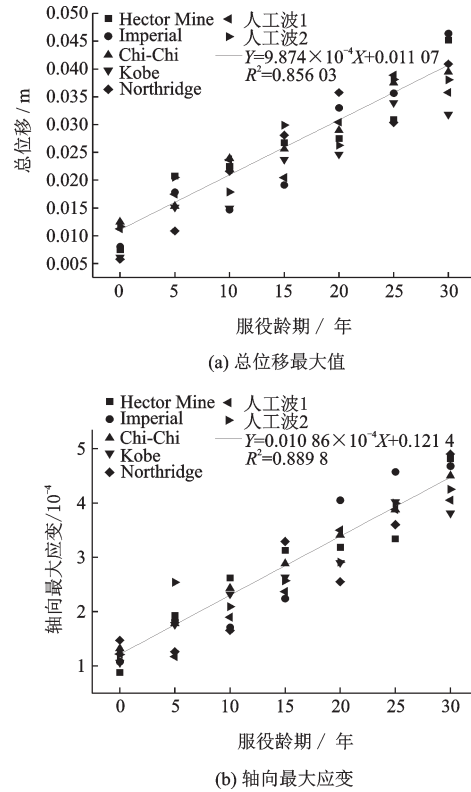


图6 酸性环境下不同服役龄期管道的地震响应规律  
 Fig.6 Seismic response low of pipes with different service ages under acidic environment

震性能退化严重,且退化率较大。在碱性土壤环境腐蚀条件下,管线腐蚀速率较慢,且表现为局部腐蚀,腐蚀程度相对较轻。碱性环境服役龄期为30年时,材料强度折减约10%,埋地钢管总位移及轴向最大应变分别扩大约1.3倍和1.1倍,其抗震性能退

表3 选自ATC-63中的5条地震动记录

Table 3 Five ground motion records from ATC-63

编号	震级	名称	地震台站	分量	PGA/g
1	7.1	Hector Mine	Hector	HECTOR/HEC090	0.34
2	6.5	Imperial, Valley	El Centro Array #11	IMPVALL/H-E11230	0.38
3	7.6	Chi-Chi, Taiwan	CHY101	CHICHI/CHY101-N	0.44
4	6.9	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	KOBE/NIS000	0.51
5	6.7	Northridge	Beverly Hills—Mulhol	NORTHR/MUL279	0.52

表4 回归公式及其显著性检验

Table 4 Regression formula and its significance test

土壤环境	地震响应	拟合公式	$R^2$	临界值 $R_{0.01}(1, n-2)$
酸性 (pH=5.5)	总位移/m	$Y = 9.874 \times 10^{-4} T + 0.01107$	0.85603	0.365
	轴向最大应变/ $10^{-4}$	$Z = 0.01086 T + 0.1214$	0.8898	
碱性 (pH=8.5)	总位移/m	$Y = 4.154 \times 10^{-4} T + 0.00852$	0.9584	
	轴向最大应变/ $10^{-4}$	$Z = 0.00422 T + 0.10693$	0.8492	

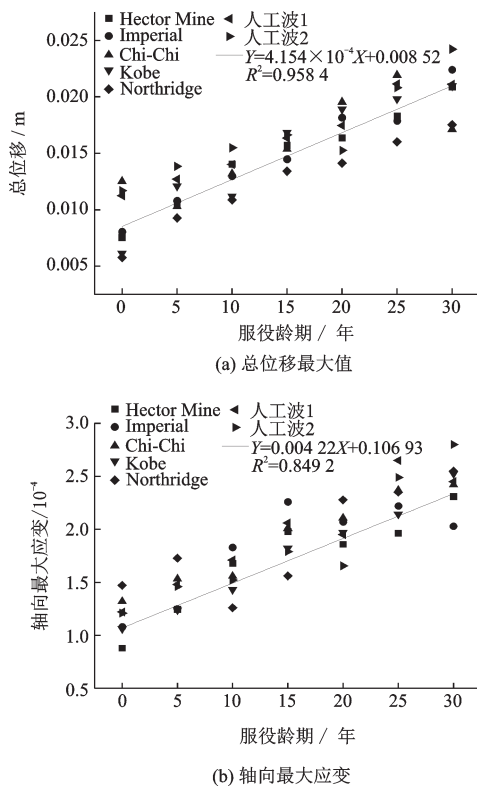


图7 碱性环境下不同服役龄期管道的地震响应规律  
Fig.7 Seismic response law of pipes after different service ages under alkaline environment

化较轻,且退化率相对较小。

## 4 结 论

(1)基于齐次马尔可夫过程建立了埋地钢管的随机腐蚀发生模型;考虑不同土壤腐蚀环境的差异,建立了酸性环境下的全面腐蚀模型与近中性及碱性环境下的局部腐蚀模型。

(2)通过对6、6.5、8、9及14 mm的5种厚度共105件钢材标准试件进行加速腐蚀模拟及拉伸破坏试验,建立了腐蚀钢材的力学性能退化规律;结合不同土壤腐蚀环境下钢材腐蚀程度量化模型,得到了不同环境多龄期埋地钢管钢材的力学性能参数。

(3)通过有限元分析,揭示并建立了酸性及碱性土壤腐蚀环境下多龄期埋地钢管的地震响应规律。不同土壤腐蚀环境埋地钢管的总位移最大值及轴向最大应变均随着服役龄期的增长而呈线性增长趋势,且不同环境下钢管抗震性能退化规律存在明显差异;酸性土壤环境下埋地钢管总位移及轴向最大应变响应随龄期的变化率分别为碱性土壤环境下的2.4倍和2.6倍。

## 参考文献:

- [1] 邵煜, 虞介泽, 俞亭超. 埋地管线均匀腐蚀失效力学模型及随机分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(6):1225-1230.  
Shao Y, Yu J Z, Yu T Ch. Mechanical model and probability analysis of buried pipelines failure under uniform corrosion[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(6):1225-1230. (in Chinese)
- [2] 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): 1-7.  
Wang G X, Fang L Ch, Zhao J. Application of the response displacement method to the aseismic analysis of corroded buried pipeline [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1):1-7. (in Chinese)
- [3] 王海涛, 常胜涛, 金慧, 等. 基于有限元法的城市埋地腐蚀管道剩余强度分析[J]. 大连交通大学学报, 2017, 38(2):94-98.  
Wang H T, Chang Sh T, Jin H, et al. Residual strength analysis of urban buried corrosion pipeline based on finite element method[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2017, 38(2):94-98. (in Chinese)
- [4] 程志远, 李黎, 张子翔, 等. 城市地下供水管道的地震反应分析[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(4): 20-23.  
Cheng Zh Y, Li L, Zhang Z X, et al. Seismic response analysis of urban buried water supply pipeline[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28(4):20-23. (in Chinese)
- [5] Ahammed M, Melchers R E. Reliability of underground pipelines subject to corrosion [J]. Journal of Transportation Engineering, 1994, 120(6):989-1002.
- [6] Valor A, Caleyó F, Alfonso L, et al. Markov chain models for the stochastic modeling of pitting corrosion [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013(6): 1962-1965.
- [7] Amirat A, Mohamed-Chateaneuf A, Chaoui K. Reliability assessment of underground pipelines under the combined effect of active corrosion and residual stress [J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping, 2006, 83(2):107-117.
- [8] 刘次华. 随机过程及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.  
Liu C H. Stochastic process and its application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [9] Bolzoni F, Fassina P, Fumagalli G, et al. Application

- of probabilistic models to localised corrosion study [J]. *Metallurgia Italiana*, 2006, 98(6):9-15.
- [10] Timashev S A, Malyukova M G, Poluian L V, et al. Markov description of corrosion defects growth and its application to reliability based inspection and maintenance of pipelines [C] // *International Pipeline Conference*, 2008, 48609: 525-533.
- [11] 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 W, Li J. Seismic response analysis of buried pipelines with stochastic corrosions [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(2):104-108. (in Chinese)
- [12] 袁庚, 王树刚, 黄一. 基于马尔可夫链的埋地燃气管管壁腐蚀预测 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(8):1328-1331.  
Yuan G, Wang Sh G, Huang Y. Application of Markov chain in prediction of corrosion conditions for buried gas steel pipeline [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(8):1328-1331. (in Chinese)
- [13] 黄涛, 陈小平, 王向东, 等. pH 值对 Q235 钢在模拟土壤中腐蚀行为的影响 [J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2016, 36(1):31-38.  
Huang T, Chen X P, Wang X D, et al. Effect of pH value on corrosion behavior of Q235 steel in an artificial soil [J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2016, 36(1):31-38. (in Chinese)
- [14] Liu Z, Zhai G, Li X, et al. Effect of deteriorated microstructures on stress corrosion cracking of X70 pipeline steel in acidic soil environment [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, 2008, 15(6): 707-713.
- [15] Wu Y H, Liu T M, Luo S X, et al. Corrosion characteristics of Q235 steel in simulated Yingtan soil solutions [J]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2010, 41(3): 142-146.
- [16] Ahammed M. Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active corrosion defects [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1998, 75(4):321-329.
- [17] 李海坤, 朱凤艳, 娄月霞, 等. 不同电阻率土壤中管线钢的自腐蚀速率分布 [J]. *腐蚀与防护*, 2017, 38(8): 598-601.  
Li H K, Zhu F Y, Lou Y X, et al. Distribution of free corrosion rate of pipeline steel in soil with different resistivity [J]. *Corrosion and Protection*, 2017, 38(8):598-601. (in Chinese)
- [18] 周方勤. 在役输气管道腐蚀剩余寿命预测技术研究 [D]. 成都:西南石油大学, 2006.  
Zhou F Q. Study on prediction technology for residual lifetime of corroded gas pipeline in service [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2006. (in Chinese)
- [19] 史炜洲, 童乐为, 陈以一, 等. 腐蚀对钢材和钢梁受力性能影响的试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(7):53-60.  
Shi W Zh, Tong L W, Chen Y Y, et al. Experimental study on influence of corrosion on behavior of steel material and steel beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(7):53-60. (in Chinese)
- [20] 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.  
Steel and steel products - Location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing GB/T 2975—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
- [21] 金属和合金的腐蚀酸性盐雾、“干燥”和“湿润”条件下的循环加速腐蚀试验: GB/T 24195—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
Corrosion of metals and alloys - Accelerated cyclic tests with exposure to acidified salt spray, “dry” and “wet” conditions: GB/T 24195—2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [22] 郑山锁, 代旷宇, 韩超伟, 等. 基于材料性能退化模型的钢排架结构易损性分析 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(17):18-24.  
Zheng Sh S, Dai K Y, Han Ch W, et al. Steel bent frame structure vulnerability analysis based on steel performance degradation model [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(17):18-24. (in Chinese)
- [23] 刘爱文. 基于壳模型的埋地管线抗震分析 [D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2002.  
Liu A W. Response analysis of buried pipeline crossing the fault based on shell-modal [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, 2002. (in Chinese)
- [24] 何双华, 柳春光. 地下管线的抗震可靠性研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.  
He Sh H, Liu Ch G. Study on seismic reliability of underground pipelines [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2014. (in Chinese)
- [25] Applied Technology Council, Federal Emergency Management Agency. Quantification of building seismic performance factors [R]. America: FEMA, 2008.

(本文责编: 赵霞)