

# 承插式复合材料埋地管道抗震性能分析

柳春光<sup>1,2</sup>, 夏春旭<sup>1</sup>, 柳英洲<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**为研究承插式复合材料埋地管道抗震性能,建立了由四个玻璃纤维/热固性材料铺层(0/90/0/90)组成的管体有限元模型。对承插式接口的力学性能进行了计算,并给出了接口在三个方向上的等效弹簧参数。对埋地管道在不同强度地震作用下的整体位移分布、各铺层的应力分布以及承插式接口的抗震性能进行了分析。结果表明,两个0°铺层的应力比两个90°铺层的轴向应力均增大75%左右;随着地震强度的增大,接口E轴向等效弹簧的相对位移与抗力随之提高;在0.2 g,0.4 g,0.6 g地震强度作用下,管道中部接口E的相对位移均未超过界限位移值,均保持正常工作状态。

**关键词:**埋地管道;承插接口;复合材料;抗震性能

中图分类号:TU990.3

文献标志码:A

## Seismic behavior of the composite buried pipe connected with socket and spigot joint

LIU Chunguang<sup>1,2</sup>, XIA Chunxu<sup>1</sup>, LIU Yingzhou<sup>1</sup>

(1. Institute of Earthquake Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The finite element model for the buried pipe made with four composite layers (0/90/0/90) connected by socket and spigot joint is established to study its seismic behavior. The mechanic property of the joint is calculated and the corresponding parameters for the equivalent springs in three directions are obtained. Under varied earthquake intensity, the distribution of the pipe displacement, the effective stress in four composite layers and the seismic behavior of the joint are studied. Results indicate that: the axial stress in 0 degree layers is 75% larger than that in 90 degree layers; the relative displacement and resisting force in the equivalent springs located at joint E increase with the increasing earthquake intensity; the axial relative displacement at joint E is kept within the allowable value under the action of 0.2 g, 0.4 g, 0.6 g seismic excitation and works in normal state under all three seismic intensities.

**Key words:** buried pipeline; socket and spigot joint; composite; seismic capability

## 引言

目前地下管道已经成为城市基础建设的核心运输工具,广泛应用于日常生活以及生产方面,被誉为城市的地下生命线。随着城市化进程以及规模的迅速发展扩大,地下管网越来越发达,遇到的地质条件也更加复

收稿日期:2017-03-11; 修订日期:2017-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51678107,51738007)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51678107,51738007)

作者简介:柳春光(1961-),男,教授,博士,主要从事生命线工程抗震方面研究. E-mail:liucg@dlut.edu.cn

通讯作者:夏春旭(1988-),男,博士研究生,主要从事结构抗震理论与性能设计研究. E-mail:15140608036@163.com

杂。我国是一个多地震的国家,基本地震烈度在 6 度以上的地区占全国总面积 60% 以上。因而,如何合理地进行埋地管道在地震荷载作用下的动力响应分析及提高其抗震安全性,一直是相关领域设计和科研人员所关心的问题<sup>[1-2]</sup>。一般情况下,管道大多埋设在地下,震害经验表明,埋地管道在强烈地震动的作用下,往往会发生严重破损,如在 2008 年汶川特大地震中,严重受灾地区给水管网基本全部损毁,受损供水管道累计达 47 642.5 km<sup>[3]</sup>。此外,因为给水管具有相对隐蔽性的特点,且管道在施工、使用过程中与土体内各种化学物质的反应、局部破坏均难以察觉并随时处理<sup>[4-7]</sup>。黄舒鹏等<sup>[8]</sup>通过正交试验方法对不同材质的管道在土体组合中的地震破坏情况进行了数值分析和研究。刘智等<sup>[9]</sup>利用建立的管道-土弹簧有限元模型考察了供热管道的地震易损性,其中管道两端为滑动支座。赵新涛等<sup>[10]</sup>结合拟静力法进行了地震波作用下埋地管道的动力响应分析,结果表明:在地震波作用下管道与土体之间的相对位移主要表现在轴向,破坏易发生在接口位置。陈春光等<sup>[11]</sup>采用原型拉拔实验测定了铸铁管道胶圈接口拉拔力与接口变形量,接头最大允许变形量可达 3~4 cm。

复合材料是由两种或者多种不同性质的材料,用物理或者化学的方法在宏观或者微观尺度上组成的具有新性能的材料<sup>[12]</sup>。一般复合材料的性能优于其组份材料的性能,改善了组份材料的力学、声学、光学、电学、热学等性能,甚至有些性能是原组分没有的。纤维复合材料作为一种优异的结构-功能一体化材料,具有非常好的结构整体性,被广泛应用于航天、航空、交通、医用等领域<sup>[13-15]</sup>。

玻璃纤维/热固性树脂纤维复合材料埋地管道作为一种极具广泛应用潜力的复合材料结构,本文对复合材料管道的抗震性能进行研究,为复合材料埋地管道结构的设计和应用提供有益的支撑,对推进复合材料埋地管道的进一步发展和应用具有非常重要的意义。

## 1 管道结构工艺及参数

管道由玻璃纤维增强热固性树脂铺层组合而成,属大口径埋地排水管道。增强体采用无碱下碱纤维缠绕纱以及无碱下碱纤维单向织物,基体采用热固性树脂及相应辅料。管体采用不间断连续出管缠绕法制作,其中管道壁结构层环向强度采用无碱下碱纤维缠绕纱浸润基体后视作 90°缠绕角的连续缠绕来提供,管道壁结构层轴向强度:采用无碱玻璃纤维单向织物以 0°缠绕角的连续铺放后浸润基体树脂来提供,整个管道壁结构层:是由 90°与 0°分层交叠缠绕而成的层合结构,层间剪应力由短切玻璃纤维抗拉强度来保证结构不分层,短切玻璃纤维强度不计入管壁结构强度的提供因素。

单管长度 6 000 mm,直径 800 mm,管厚度方向共 4 层纤维铺层,2 层环向,2 层轴向。管密度为 1.6 g/cm<sup>3</sup>。环向与轴向纤维铺层的各参数如表 1 所示,其中  $T$  为各铺层的厚度, $E_a, E_b, E_c$  分别为单个铺层的三个材料主方向上的弹模, $V_{ba}, V_{ca}, V_{cb}$  分别为三个方向相应的泊松比, $G_{ab}, G_{bc}, G_{ca}$  分别为三个方向相应的剪切模量。环向与轴向纤维铺层方向如图 1 所示。管道接头采用柔性承插接头,允许最大轴向移动 20 mm,两轴线最大允许偏转挠度 3°。复合材料管道壁的铺层设置如图 1(c) 所示,其中内侧第 1 层为 0°铺层,由内向外依次为 0/90/0/90 铺层结构。

表 1 环向与轴向纤维铺层参数

Table 1 Parameters for the axial and circumferential fiber layers

	$T$ (mm)	$E_a$ (Pa)	$E_b$ (Pa)	$E_c$ (Pa)	$V_{ba}$	$V_{ca}$	$V_{cb}$	$G_{ab}$ (Pa)	$G_{bc}$ (Pa)	$G_{ca}$ (Pa)
环向	4	3.149e+9	1.2e+9	1.2e+9	0.3	0.3	0.115	3.77e+9	2.e+8	3.77e+9
轴向	0.5	2.2e+9	1.2e+9	1.2e+9	0.3	0.3	0.16	3.77e+9	2.e+8	3.77e+9

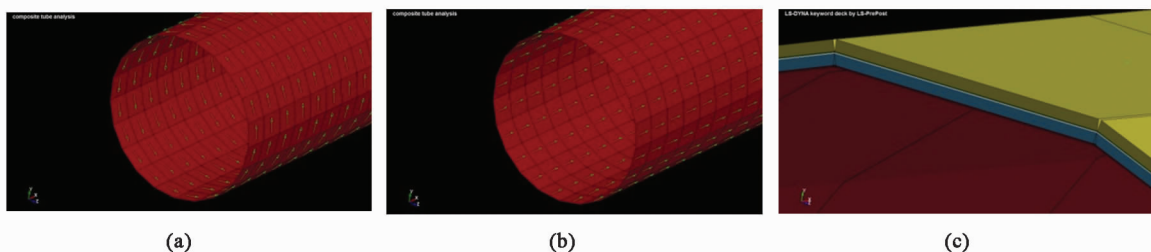


图 1 管壁 0°和 90°铺层示意图

Fig. 1 Schematic of 0° and 90° fiber layers

## 2 管周土体参数

管子周围土层为砂土,土体参数如表2所示。管土之间摩擦系数参考表3取0.6。土弹簧参数计算方法参考 American Lifelines Alliance<sup>[16]</sup>,轴向、水平方向和垂直方向的土弹簧力与位移关系曲线如图2所示,其中 $t_u, p_u, q_u$ 和 $x_u, y_u, z_u$ 分别表示3个方向的屈服力和土弹簧最大弹性变形值,如表4所示,其中的屈服力将按照有限元网格划分情况均匀分布于管道各个节点上。

表2 砂土材料参数  
Table 2 Parameters for sand

土体类型	容重(kN/m <sup>3</sup> )	内聚力(kPa)	内摩擦角(°)	摩擦系数
砂土	16.7	0	30	0.65

表3 防腐层摩擦系数取值  
Table 3 Frictional coefficient for anticorrosive coating

防腐层	混凝土	沥青类	粗糙钢管	光滑钢管	环氧类	聚乙烯类
	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6

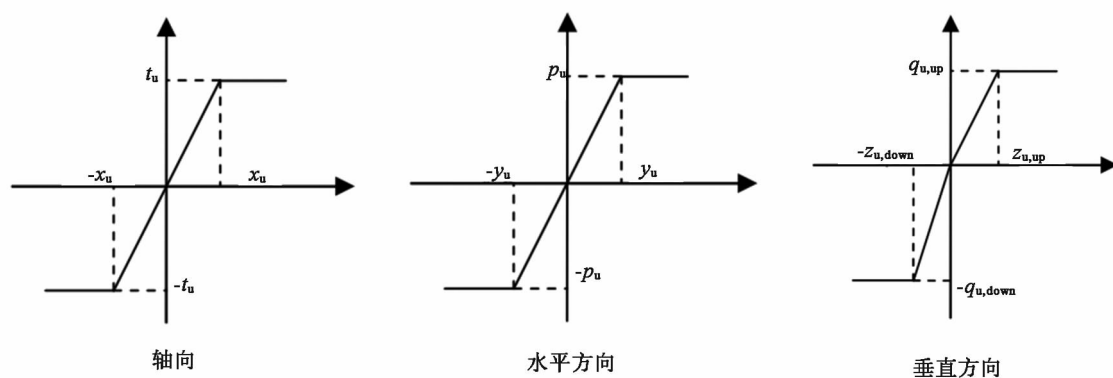


图2 土弹簧三个方向力与位移关系曲线

Fig. 2 Force-displacement curves of the soil spring in three directions

表4 三个方向土弹簧参数

Table 4 Parameters of the soil spring in three directions

轴向屈服位移(m)	轴向屈服力(N/m)	水平屈服位移(m)	水平屈服力(N/m)	垂直上屈服位移(m)	垂直上屈服力(N/m)	垂直下屈服位移(m)	垂直下屈服力(N/m)
0.003	15 342.1	0.08	133 945.5	0.03	25 619.32	0.08	461 227.3

## 3 管道接头力学性能

承插式管道接头属于柔性接头,其力学性能决定了管道的抗震能力。承插式管道接头涉及到承管与密封橡胶、密封橡胶与插管以及承管与插管之间复杂的接触摩擦行为。图3为橡胶密封圈的尺寸图,该密封圈由弹性模量为7.8 MPa的橡胶材料构成,两个密封环的高度分别为15.29 mm,45.87 mm,两个密封环之间的间隔为10 mm,橡胶圈宽度为87.23 mm,厚度为5 mm。

采用精细的有限元方法模拟承插式管道在地震、液化和沉陷工况下的管道响应问题效率低下<sup>[17]</sup>,因此采用弹簧简化方法模拟有接头管道的力学行为。本节将对承插式管道接头建立精细有限元模型,分析其沿各主轴的力学性能,根据本节的分析结果,在后续分析中采用基于本节分析结果的简化弹簧单元来连接两相邻管道。接头的破坏通过弹簧的相对伸长与相对转角来控制。

有限元模型采用 LS-DYNA 建立并计算,其中橡胶弹模为 7.8 MPa,密度取为 1 100 kg/m<sup>3</sup>。采用 MAT\_Mooney-Pivlin\_Rubber 模型,网格划分采用 8 节点块体单元。插管和承管接口处采用 MAT\_Rigid 模型,插管网格划分采用 8 节点块体单元,承管网格划分采用 4 节点壳单元。橡胶封条与两个接头管道之间的接触采用 CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACES\_TO\_SURFACES 定义,橡胶自身的接触采用 CONTACT\_AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE 定义,摩擦系数统一取 0.2。考虑到橡胶与管道的材料弹模相差较大,采用 SOFT = 1 算法来计算接触等效弹簧刚度。管道接头有限元模型如图 4 所示。

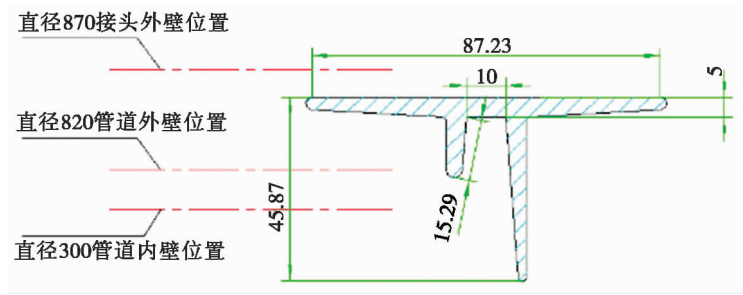


图 3 承插接口橡胶密封圈  
Fig. 3 The rubber ring at the joint

管道接头有限元模型如图 4 所示。

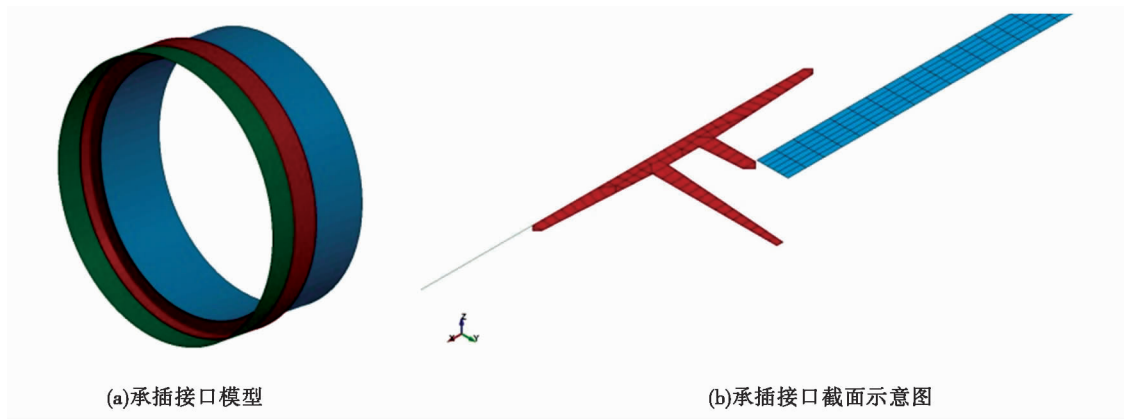


图 4 管道接头有限元模型

Fig. 4 Finite element model for the pipe joint

### 3.1 轴向力学性能

将插管口沿管道轴向插入承管口的过程中,橡胶密封胶圈将产生摩擦力阻止插管的运动,在有限元模型中,通过设置部件之间的接触以及摩擦系数来模拟这一过程。图 6 为管道轴向线位移作用下的插管与橡胶圈在不同轴向位移下的变形图。管道柔性承插接口的轴向摩擦力与位移关系曲线如图 5 所示,摩擦力总体上呈现先上升后缓慢下降的趋势。在轴向位移达到 0.022 m 之前时,摩擦力曲线由三个部分组成:OA:开始阶段的直线上升,此阶段对应的是插管与较短胶圈环之间的接触,AB:短暂的下陷段,此阶段对应的是插管位于长短胶圈环之间的阶段,通过图 4(b)可知承插口橡胶圈中由两个高低不等的胶圈环组成,两处胶圈环之间距离为 0.01 m,插管在此阶段由于还没有与长胶圈环发生接触,故摩擦力发生下降。BC:第二个直线上升阶段,对应插管与第二个胶圈环的接触过程。考虑到管道最大相对轴向位移设定为 0.02 m,提出等效轴向弹簧本构模型如图 7 所示,其参数取值见表 5。

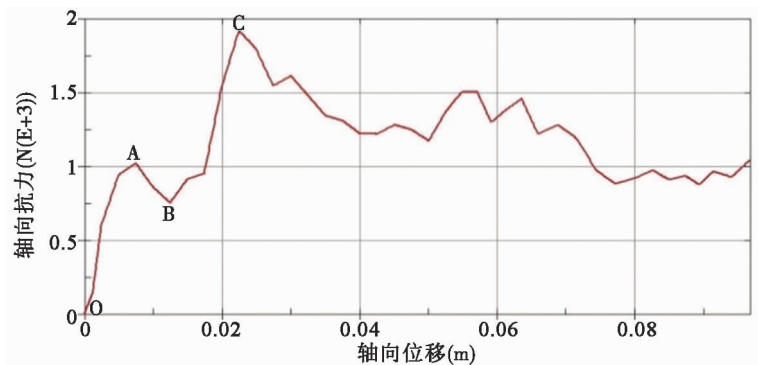


图 5 管道柔性承插接口轴向摩擦力与位移关系曲线  
Fig. 5 Axial frictional force verse displacement for the Socket And Spigot Joint

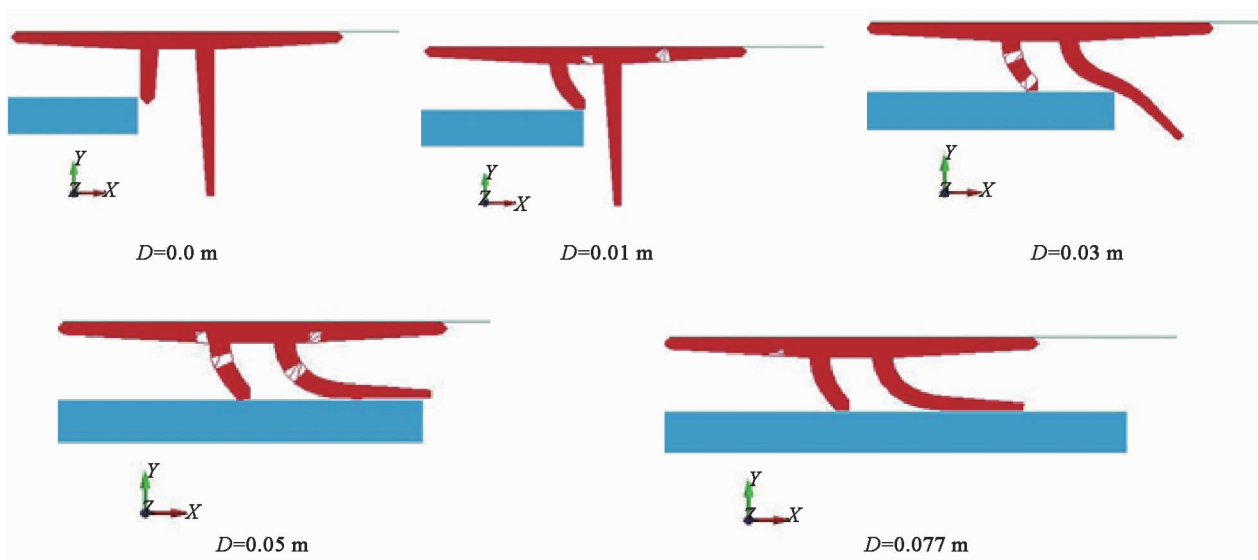


图6 轴向线位移作用下橡胶圈变形图

Fig. 6 Deformation of the rubber ring under the action of axial displacement

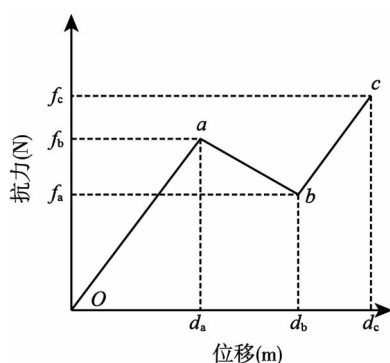


图7 等效轴向弹簧本构模型

Fig. 7 Equivalent axial spring model

表5 轴向等效弹簧参数

Table 5 Parameters for the equivalent axial spring model

$d_a$ (m)	$d_b$ (m)	$d_c$ (m)	$f_a$ (N)	$f_b$ (N)	$f_c$ (N)
0.006 7	0.0121	0.02	1 000	774	1 500

### 3.2 弯曲力学性能

在插管与承管组装状态完成后,通过对插管设置绕  $z$  轴的转角位移,以获得接触面上总抵抗弯矩,转角与弯矩关系曲线如图 8 所示。在转动角度达到  $0.0126 \text{ rad}$  之前, $z$  向抵抗弯矩以弯曲刚度  $2554.7 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$  呈线性增长;当转动角度继续增加到  $0.0384 \text{ rad}$  的阶段内,橡胶圈的弯曲刚度下降为  $824.9 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ ,降幅为  $32.3\%$ ;当插管  $z$  向转动角度超过  $0.0384 \text{ rad}$  之后,橡胶圈存在一处明显的弯矩降低现象,分析原因主要是在此转动角度时插管与橡胶圈中较短的密封环脱离导致,如图 9 所示。随着插管转角继续增大超过  $0.047 \text{ rad}$  时,对立面的较短橡胶圈将受到来自插管更大的压力,此时接口的抵抗弯矩又恢复增大。

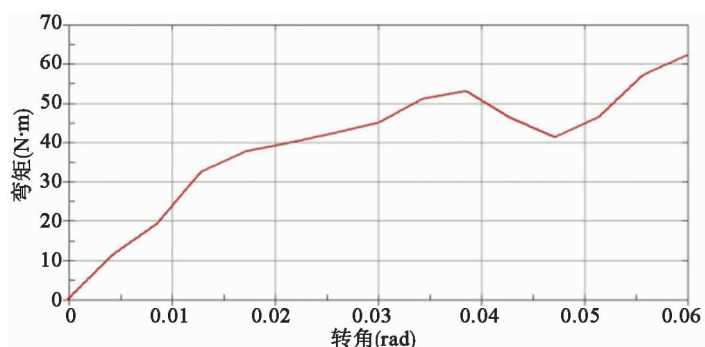


图8 承插接口弯矩与转角关系曲线

Fig. 8 Moment-curvature curve for the Socket And Spigot Joint

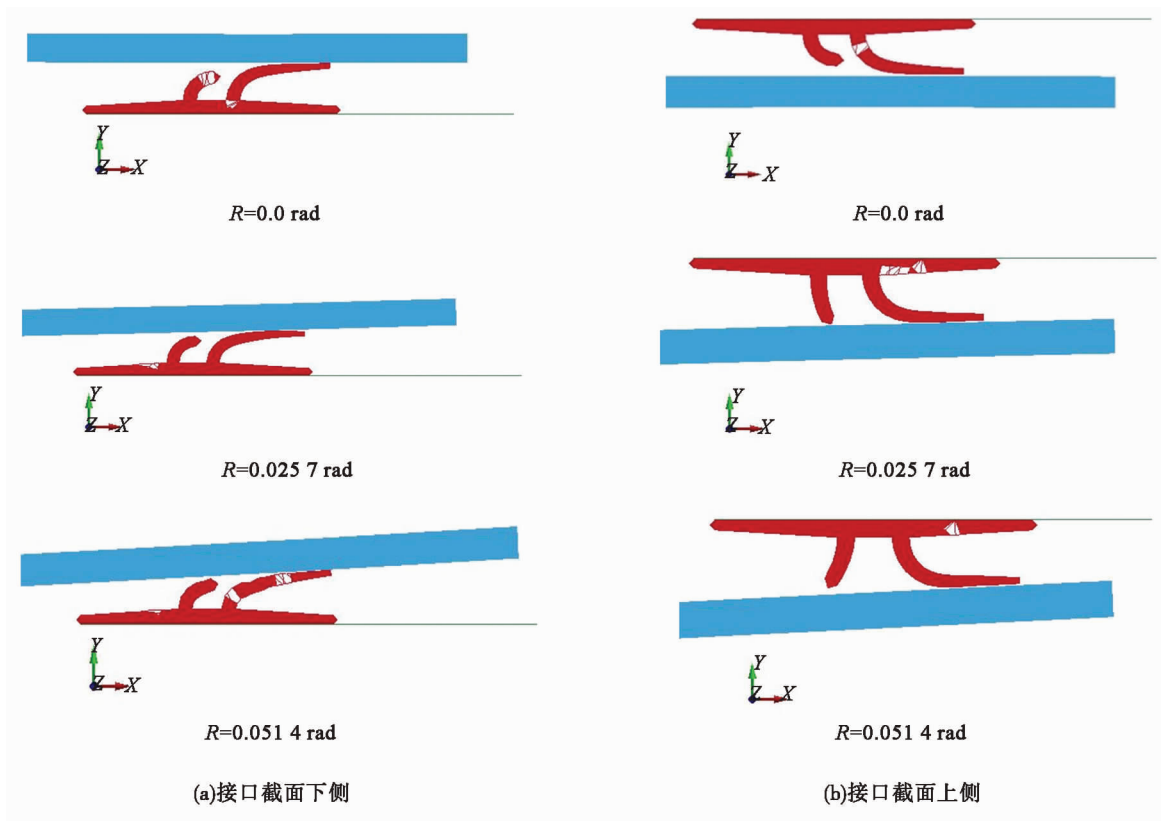


图 9 在  $z$  轴转角作用下橡胶密封环变形

Fig. 9 Deformation of the rubber ring under the angle displacement at  $z$  axis

### 3.3 横向力学性能

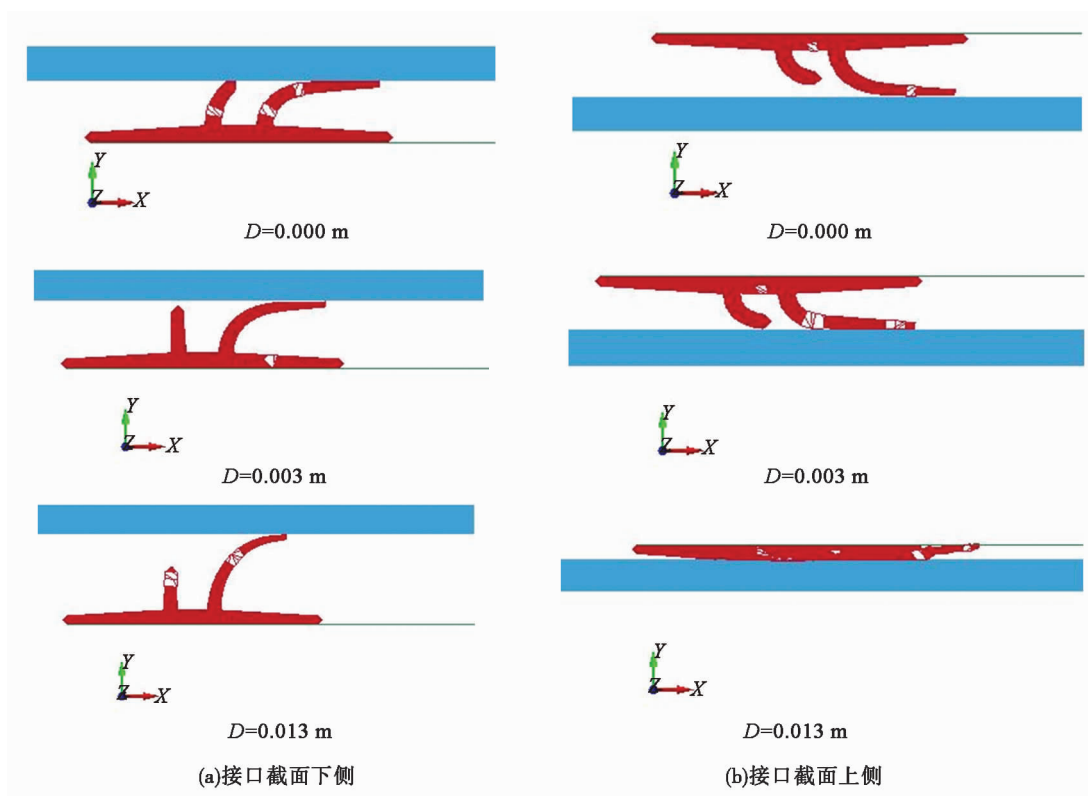


图 10 横向线位移作用下橡胶圈变形图

Fig. 10 Deformation of the rubber ring under the transverse displacement

约束插管的  $x, z$  向线位移以及所有的转动自由度, 仅对插管施加  $y$  向的线位移可以得到柔性承插管道

接口的横向抗力,此抗力源自插管与橡胶密封圈之间的接触行为。将管道沿  $x$ - $y$  轴平面切开,得到如图 10 所示的橡胶圈截面变形图,在  $y$  向线位移的作用下,下侧橡胶圈逐渐脱离插管,而上侧橡胶圈逐渐被压平。图 11 所示为  $y$  向的线位移与  $y$  向总抗力的关系曲线。由图 3 可知插管外壁与承管内壁之间的净距为 0.018 m,由于橡胶圈的存在,插管沿  $y$  轴的线位移最大值不会达到此值,由图 11 可知插管  $y$  向线位移达到了 0.013 m,对应的  $y$  向抗力达到 150 kN 左右。

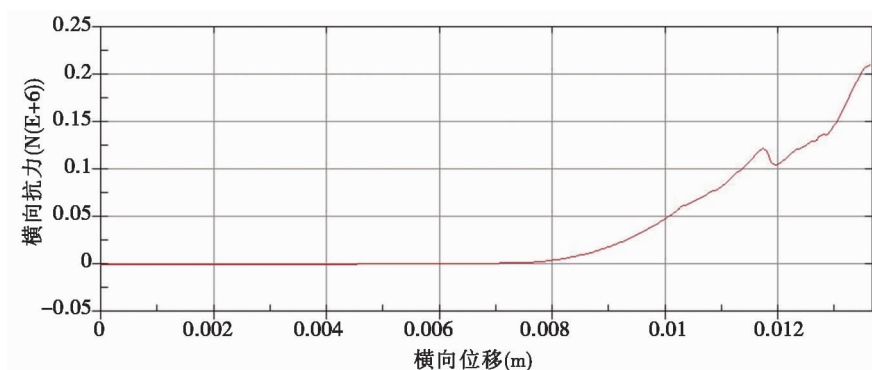


图 11  $Y$  向线位移与抗力的关系曲线

Fig. 11 Curve for the resisting force-displacement in  $y$  axis

## 4 管道抗震性能

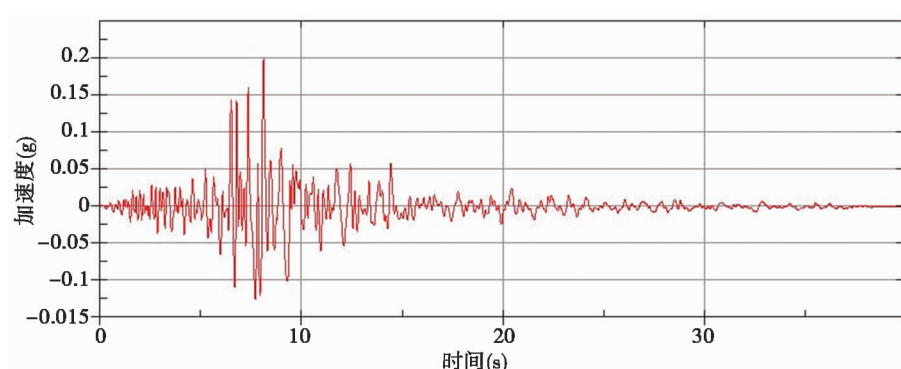


图 12 Northridge 地震动时程 (PGA = 0.2 g)

Fig. 12 Northridge earthquake time-history (PGA = 0.2 g)

选用 Northridge 地震动记录时程作为激励时程输入到管线轴向方向,其波形如图 12 所示。将 PGA 分别调整至 0.2 g, 0.4 g, 0.6 g 以分别对应 7 度、8 度以及 9 度地震工况。建立由柔性承插接头连接的 8 根纤维复合材料管道有限元模型如图 13 所示,管道接口处局部刚化,在两根相邻管道边缘设置第 4 节中建立的等效弹簧单元简化模拟柔性承插接口的力学行为。为便于后续分析,将图 13 中的管道由左至右依次编号为 1-8 号管道,管子之间的接口以及两端固定端从左向右依次编号为 A-J。管线端部采用滑动支承边界条件,即约束管线横向位移,管线可在轴向运动。

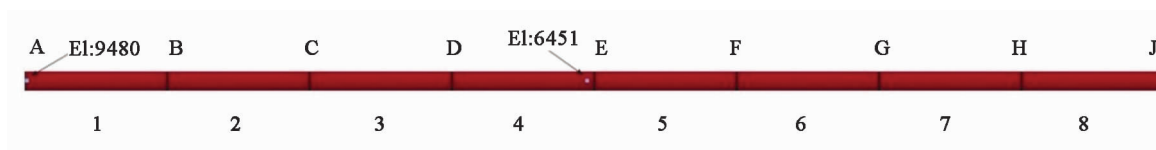


图 13 柔性承插接头管道有限元模型及编号

Fig. 13 Finite element model and the numbering for the pipe

### 4.1 管道整体位移

图 14 为埋地管道在 0.2 g、0.4 g、0.6 g 地震强度作用下的位移分布云图,管道位移在 0.2 g、0.4 g、0.6 g 地震作用下最大位移分别为  $2.946 \times 10^{-2}$  m,  $5.886 \times 10^{-2}$  m,  $9.378 \times 10^{-2}$  m。除各别位置有微小差别外,管线轴向位移响应基本上呈均匀分布模式。

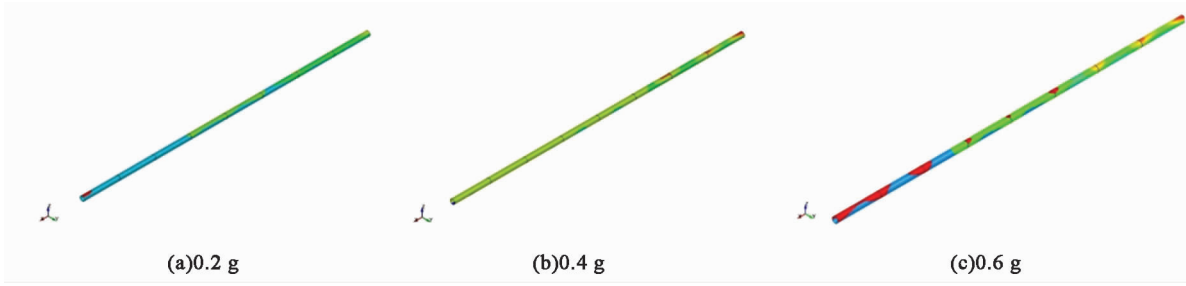


图 14 地震作用下管道轴向位移云图

Fig. 14 Axial displacement response of the pipe under the action of earthquake

### 4.2 各铺层有效应力

选取管道中部壳单元的 4 个铺层的轴向应力时程分析,如图 15 所示。由图可知,中部管体的 2 个 0°铺层的应力存在较小差别:第 3 铺层应力稍大于第 1 铺层应力。2 个 90°铺层的应力也存在较小差别:第 4 铺层应力稍大于第 2 铺层应力。在地震动强度为 0.2 g,0.4 g,0.6 g 的作用下,管道中部的轴向应力最大值分别为 2.394e3 Pa,4.517 8e3 Pa ,6.638e3 Pa,其轴向应力最大值随着地震动强度的增大而近似成线性增长。对于中部管体的四个铺层,在 3 个地震动强度作用下,2 个 0°铺层的应力比 2 个 90°铺层的轴向应力均增大 75% 左右。可见两个 0°铺层在轴向的贡献比 2 个 90°铺层的要大,这也是复合层板设计的基本原则。

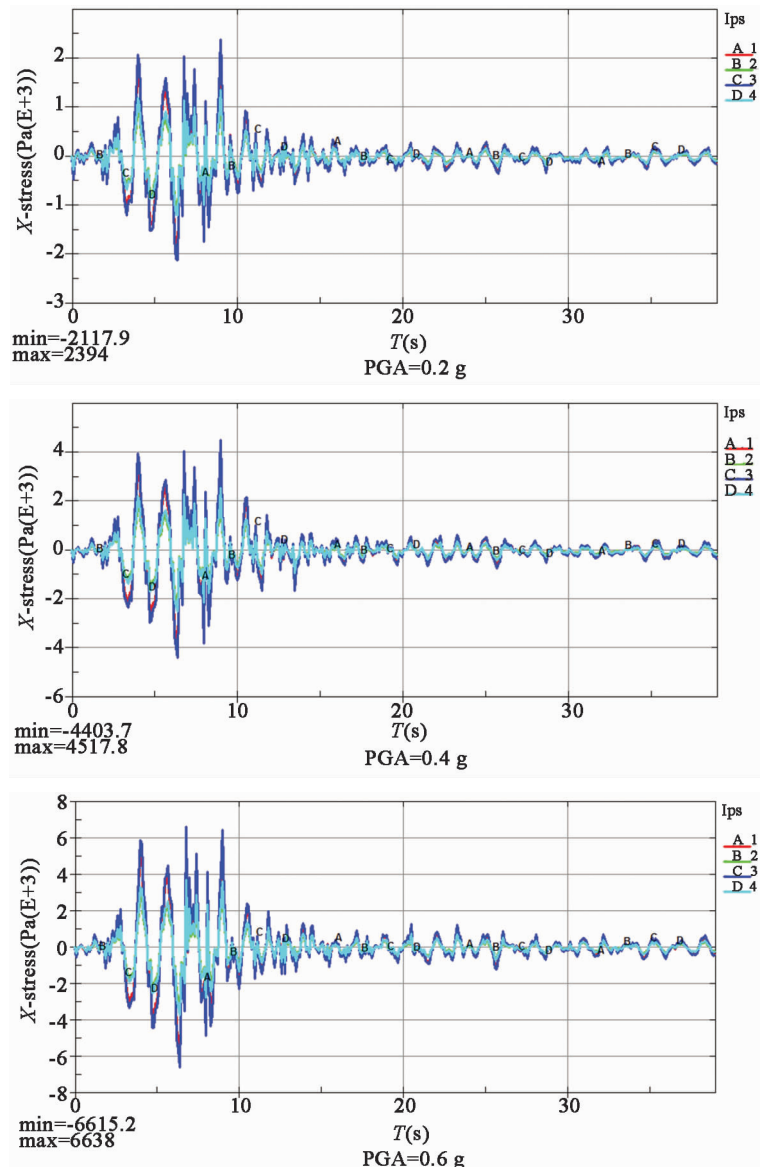


图 15 管道中部 (el:6451) 各铺层轴向应力时程

Fig. 15 Axial stress histories for the four composite layers at the middle of the pipe (el:6451)

### 4.3 管道接口位移

接口相对位移若超过限值,将导致管线在接口处脱出,进而管线失效。地震波在管道轴向加载,因此管道接口的轴向地震响应为本文的主要研究对象。管道中部接口 E 的相对位移与抗力时程如图 16 所示,考虑到接口相对位移限值为 20 mm,故均未达到破坏状态。0.2 g 地震强度下,E 接口轴向抗力最大值为 0.02 N,轴向相对位移最大值为  $1.3784 \times 10^{-7}$  m。0.4 g 地震强度下,E 接口轴向抗力最大值为 0.0275 N,轴向相对位移最大值为  $1.844 \times 10^{-7}$  m。0.6 g 地震强度下,E 接口轴向抗力最大值为 0.0327 N,轴向相对位移最大值为  $2.1886 \times 10^{-7}$  m。值得注意的是管道中部接口 E 的轴向抗力较小但并非为零,这说明管道中部接口 E 两侧的管道在地震作用下仍存在较小的轴向相对位移。

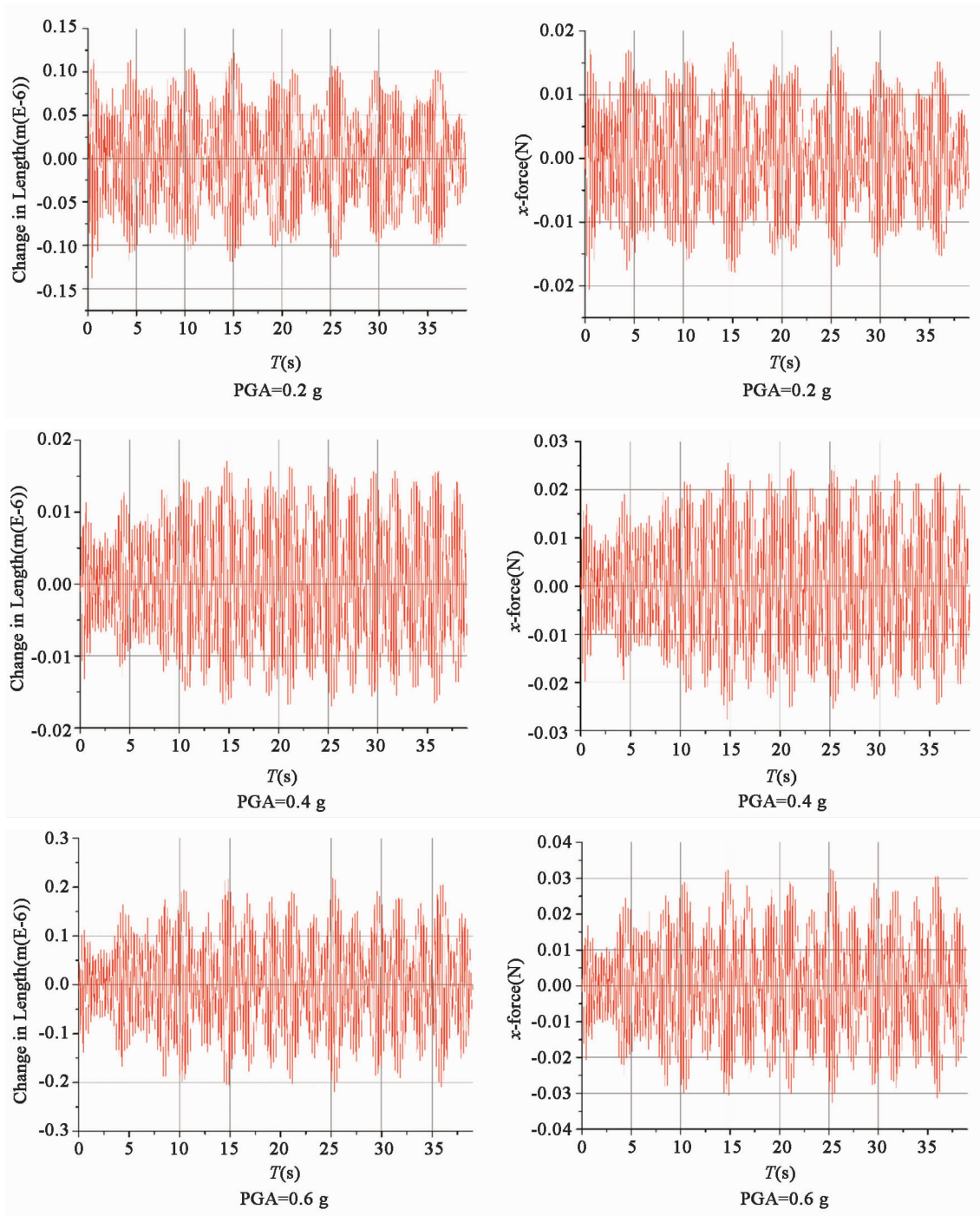


图 16 中部接口 E 的轴向相对位移与抗力时程曲线

Fig. 16 Time histories for the axial relative displacement and resisting force at joint E

## 5 结论

针对纤维复合材料埋地管道在地震作用下的抗震性能进行分析。首先基于管道基本参数以及管周土体参数建立了纤维复合材料埋地管道有限元模型,管周土体采用等效三向弹塑性弹簧模拟,针对柔性承插接口建立了精细模型并给出了柔性承接接口等效轴向弹簧本构参数、等效弯曲弹簧本构参数以及等效横向弹簧参数。

管道在轴向地震作用下的响应:除各别位置有微小差别外,管线轴向位移响应基本上呈均匀分布模式,中部管道之间存在较小的相对轴向位移。在 3 个地震强度作用下,管道中部的轴向应力最大值分别为 $2.394 \times 10^3 \text{ Pa}$ 、 $4.5178 \times 10^3 \text{ Pa}$ 、 $6.638 \times 10^3 \text{ Pa}$ ,其轴向应力最大值随着地震动强度的增大而近似成线性增长。2 个  $0^\circ$  铺层的应力比 2 个  $90^\circ$  铺层的轴向应力均增大 75% 左右。在三个地震强度作用下,中部接口 E 轴向抗力最大值均较小,分别为 0.02 N,0.027 5 N,0.032 7 N。管道中部接口 E 的相对位移响应均未达到破坏限值。

### 参考文献:

- [1] 徐磊,叶志才,任青文. 地震荷载作用下埋地玻璃钢夹砂管的动力响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(4): 468-474.  
XU Lei, YE Zhicai, REN Qingwen. Numerical analysis of dynamic response of buried frpm pipe under seismic loading[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(4): 468-474. (in Chinese)
- [2] Datta T K. Seismic response of buried pipelines; A state-of-the-art review[J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 192(2): 271-284.
- [3] 李宏男,肖诗云,霍林生. 汶川地震震害调查与启示[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 10-19.  
LI Hongnan, XIAO Shiyun, HUO Linsheng. Damage investigation and analysis of engineering structures in the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 10-19. (in Chinese)
- [4] 王志佳,徐海岩,张浩,等. 地下管线管体破坏模式分类与发生机制[J]. 世界地震工程, 2016, 32(4): 118-124.  
WANG Zhijia, XIA Haiyan, ZHANG Hao, et al. Mode classification and mechanism of failure of underground pipeline body[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(4): 118-124. (in Chinese)
- [5] 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 Zhiyuan, LI Li, ZHANG Zixiang, 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)
- [6] 史永霞. 埋地管线在沉陷情况下的响应分析[D]. 大连:大连理工大学, 2007.  
SHI Yongxia. Response analysis for buried pipelines subjected to the settlement[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [7] 柯国敏. 液化土中埋地管线的响应分析[D]. 大连:大连理工大学, 2010.  
KE Guomin. Response analysis for buried pipeline in liquefied soil[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [8] 黄舒鹏,彭功勋,魏立新,等. 不同土体组合下地下管线抗震性能研究[J]. 科技创新导报, 2014(23): 197-200.  
HUANG Shupeng, PENG Gongxun, WEI Lixin, et al. Seismic behavior of underground pipeline under different soil combinations[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2014(23): 197-200. (in Chinese)
- [9] 刘智,郭恩栋,胡少卿,等. 供热管道地震易损性分析[J]. 工程力学, 2013, 30(7): 187-192.  
LIU Zhi, GUO Endong, HU Shaoqing, et al. Seismic vulnerability analysis of heat supply pipeline[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 187-192. (in Chinese)
- [10] 赵新涛,程贵海,冯国建. 地震波作用下的埋地燃气管道动力响应研究[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(1): 357-363.  
ZHAO Xintao, CHENG Guihai, FENG Guojian. Study on dynamic response of buried gas pipelines to seismic waves[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(1): 357-363. (in Chinese)
- [11] 陈春光,杨庆华,孔杰,等. 铸铁管道胶圈承插接口抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(3): 104-108.  
CHEN Chunguang, YANG Qinghua, KONG Jie, et al. Experimental research on seismic capability of cast-iron pipe with rubber gasket joints [J]. Journal Of Earthquake Engineering And Engineering Vibration, 2012, 32(3): 104-108. (in Chinese)
- [12] 沈观林,胡更开. 复合材料力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.  
SHEN Guanlin, HU Gengkai. Mechanics of composite materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [13] 赵艳荣,胡平,梁继才,等. 碳纤维复合材料在汽车工业中的应用[J]. 合成树脂及塑料, 2015, 32(5): 95-98.  
ZHAO Yanrong, HU Ping, LIANG jicai, et al. Application of carbon fiber composites in the automotive industry[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2015, 32(5): 95-98. (in Chinese)
- [14] Yousif BF, Ku H. Suitability of using coir fiber/polymeric composite for the design of liquid storage tanks[J]. Material & design, 2012, 36: 847-853.
- [15] Dash D, Samanta S, Gautum SS, et al. Mechanical characterization of natural fiber reinforced composite material[J]. Advanced Material Manufacturing and Characterization, 2013, 3(1): 275-280.
- [16] Antaki, G A, Hart J D, Adams T M, et al. Guidelines For The Design Buried Steel Pipe[R]. USA: American Society of Civil Engineers, 2001.
- [17] 王颂翔. 承插式给水管道的安全评价研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.  
WANG Songxiang. Study on Safety Evaluation Of Water Supply Pipelines With The Socket And Spigot Joint[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)