

DOI: 10.11779/CJGE202106019

纵向非一致激励下非均匀场地中埋地管道的振动台试验研究

韩俊艳, 郭之科, 李满君, 李立云, 侯本伟, 杜修力*

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 埋地管道的地震响应主要受管道沿线地震动空间分布特性及场地非均匀性的影响。为研究非均匀场地中埋地管道在纵向非一致激励下的抗震性能, 开展了均匀和非均匀场地中埋地管道的多点非一致激励振动台模型试验。分析了均匀和非均匀场地中埋地管道在不同地震强度作用下的应变响应, 研究了纵向非均匀场地对埋地管道地震反应的影响。试验结果表明, 在纵向一致激励作用下, 非均匀场地中埋地管道轴向方向上的最大峰值应变出现在场地变化的过渡区, 且其高于均匀场地下下的峰值应变。在纵向非一致激励作用下, 在较低加载等级下, 管道峰值应变的大小与均匀场地下相比有所减小, 但在较高加载等级下, 峰值应变却急剧增加。与纵向一致激励作用不同, 在纵向非一致激励和非均匀场地的共同作用下, 最大峰值应变可能出现在场地变化的过渡区或土体介质较软的场地中。研究结果为进一步研究非均匀场地对埋地管道地震响应的影响提供了依据。

关键词: 埋地管道; 多点激励振动台试验; 非均匀场地; 纵向非一致地震激励

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2021)06-1147-10

作者简介: 韩俊艳(1983—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事地下结构抗震方面的研究。E-mail: junyanhan@bjut.edu.cn。

Shaking table tests on buried pipelines in inhomogeneous soil under longitudinal non-uniform seismic excitation

HAN Jun-yan, GUO Zi-ke, LI Man-jun, LI Li-yun, HOU Ben-wei, DU Xiu-li

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 1000124, China)

Abstract: The seismic response of buried pipelines is primarily affected by the spatial variation characteristics of earthquake motion and the soil inhomogeneity. To investigate the seismic performance of pipelines buried in inhomogeneous soil under longitudinal non-uniform seismic excitation, two multi-point shaking table tests are carried out on model pipelines: one model is buried in homogeneous soil, and the other is buried in inhomogeneous soil. The test results are analyzed and discussed in terms of the strains of the pipelines buried in both homogeneous and inhomogeneous soils under different earthquake intensities, and the influences of longitudinal inhomogeneous sites on the seismic response of the pipelines are studied. The test results indicate that the peak strain of the pipelines in the transient zone where the soil properties change in the inhomogeneous soil model is higher compared with the response in the homogeneous soil model under longitudinal uniform seismic excitation. The maximum strain along the pipeline axis occurs in the transient zone. However, under the longitudinal non-uniform seismic excitation, although the magnitude of the strain peak is decreased compared with the homogeneous soil case at lower loading intensity, similar magnitudes of strain are observed at higher loading intensity, and there is a sharp increase in the strain peaks. Unlike the longitudinal uniform excitation case, the maximum strain peak may appear in the transient zone or soil changed zone due to the combined action of longitudinal non-uniform excitation and inhomogeneous soil. The results may provide insights into the site effects of inhomogeneous soil conditions on the seismic response of buried pipelines.

Key words: buried pipeline; multi-point shaking table test; inhomogeneous soil; longitudinal non-uniform seismic excitation

0 引言

埋地管道是典型的跨度大、轴向刚度低的长线型地下结构, 极易遭受地震破坏。国内外埋地管道的抗

基金项目: 国家青年科学基金项目(51808018); 北京市教委科技一般项目(KM201910005022), 国家自然科学基金项目(U1839201, 51978023)

收稿日期: 2020-09-03

*通信作者 (E-mail: duxl@iwhr.com)

震研究表明^[1-4], 埋地管道的场地破坏基本有两种: ①由于永久性地面变形(如断层、滑坡等)引起的破坏; ②非均匀场地中地震波传播造成的破坏。以往的研究^[5-7]主要集中在对跨断层埋地管道破坏的分析, 对非均匀场地中埋地管道的地震响应研究, 尤其试验研究相对较少。然而, Nishio 等^[8-11]的震后调查研究表明, 非均匀场地中埋地管道的破坏率明显高于均匀场地, 穿越非均匀场地的埋地管道遭受了严重的破坏。因此, 研究非均匀场地对埋地管道抗震性能的影响对其抗震设计具有重要的指导意义。

国内外学者主要通过理论分析的方法研究场地变化对埋地管道抗震性能的影响。Hind 等^[12]采用集中质量模型对均匀场地和由两种不同土体组成的非均匀场地中的埋地管道的地震响应进行了理论研究。结果表明, 非均匀场地中埋地管道的应力在靠近两种不同土体交界处最高, 且峰值应力会超过忽略管-土相互作用的软土均匀场地的预测值。谢旭等^[13]应用表面波理论研究埋地管道通过非均匀场地时的地震反应。结果表明, 非均匀场地中埋地管道的地震反应大于均匀场地, 且越不均匀的场地, 管道的应力越大。Nishio^[11]基于现场观测研究了场地非均匀性对管道的影响, 发现沿管道方向场地的非均匀土体边界附近的管道发生了较高的应变。Liang^[14]利用弹性半无限空间动力问题的基本解, 求解非均匀场地中管-土的动力相互作用, 进而进行了三维地震反应分析。结果表明, 通过两种不同介质非均匀场地的管道地震响应与均匀场地有较大差异, 应力比值可超过 2 倍以上, 且管道应力在软土中大于硬土中。梁建文等^[15]对穿越 3 种土介质场地的管道进行地震反应分析。结果表明, 管道的动力响应取决于土介质的软硬程度、排列顺序以及中间土介质的宽度, 3 种土介质场地与两种土介质场地有根本的不同, 不能将 3 种土介质场地看作两个两种土介质场地的简单组合, 并将这一原因归结为地震波在土体交界面上多次反射和投射形成波的聚集。黄忠邦等^[16]采用一维有限元法, 对埋地管道在均匀和非均匀场地中的地震反应进行了分析研究, 并与人工模拟的试验进行了比较。结果表明, 随着土介质非均匀程度的增大, 管线轴向应变与应力也增大, 非均匀场地中的管道轴向应变与均匀场地中管道的轴向应变相比, 增大系数为 1.5 倍左右。

上述研究表明, 非均匀场地中埋地管道的破坏要比均匀场地中埋地管线的破坏大得多, 且沿管道方向场地的非均匀性是引起管道产生应变的主要原因。而目前利用振动台试验研究非均匀场地中埋地管道地震响应的成果还很鲜见。为深入研究埋地管道在非均匀

场地中的地震响应, 笔者首次开展了非均匀场地埋地管道多点非一致激励振动台试验。在振动台试验中沿管道轴线方向, 将土体划分为 3 个区域模拟土体的非均匀性。本文通过对不同地震强度作用下管道加速度和应变等试验数据的分析, 研究了非均匀场地中埋地管道的地震响应特性及其变化规律。

1 振动台模型试验介绍

1.1 试验模型箱和相似比设计

本试验在北京工业大学多点多维地震振动台台阵系统上进行, 单台面尺寸均为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, 可实现三向六自由度加载, 可输出正弦波、白噪声、冲击波及地震波, 峰值加速度为 2.0 g (X, Y)、 1.0 g (Z)。笔者采用自主研制的悬挂式连续体模型箱, 开展了非均匀场地下埋地管道的三台阵振动台试验, 试验用悬挂式连续体模型箱如图 1 所示。悬挂式连续体模型箱由 3 个刚性箱和两个软连接箱组成, 总尺寸为 $7.3\text{ m} \times 1.4\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高), 内净空尺寸为 $7.0\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 1.2\text{ m}$, 在模型箱四周内壁设置泡沫板以减小模型箱边界效应的影响。悬挂式连续体模型箱的设计及其适用性试验验证详见文献[17]。



图 1 三台阵振动台试验悬挂式连续体模型箱

Fig. 1 Suspension continuum model box of three-shake table tests

笔者基于 Buckingham 定理^[18]设计了模型管道和模型土体的相似比。并通过建立的原型及考虑不同相似比的管-土相互作用有限元模型, 比较了缩尺模型与原型结构动力响应, 选择埋地管道地震反应与原型管道地震反应最接近的相似关系为本试验的模型相似关系, 相似关系的确定详见文献[19]。长度 l 、弹性模量 E 、密度 ρ 、应变 ε 、频率 f 、加速度 a 和重力加速度 g 的相似关系见表 1。

表 1 非自由场试验主要物理量相似常数

Table 1 Key similitude constants of non-free field tests

材料	S_l	S_E	S_ρ	S_ε	S_f	S_a	S_g
管道	1/10	1/57	1/6.5	1	5	2.5	—
土体	1/10	1/4	1	1	5	2.5	—

1.2 试验模型结构与模型土

本试验模型管道材料采用弹性模量较低的有机玻

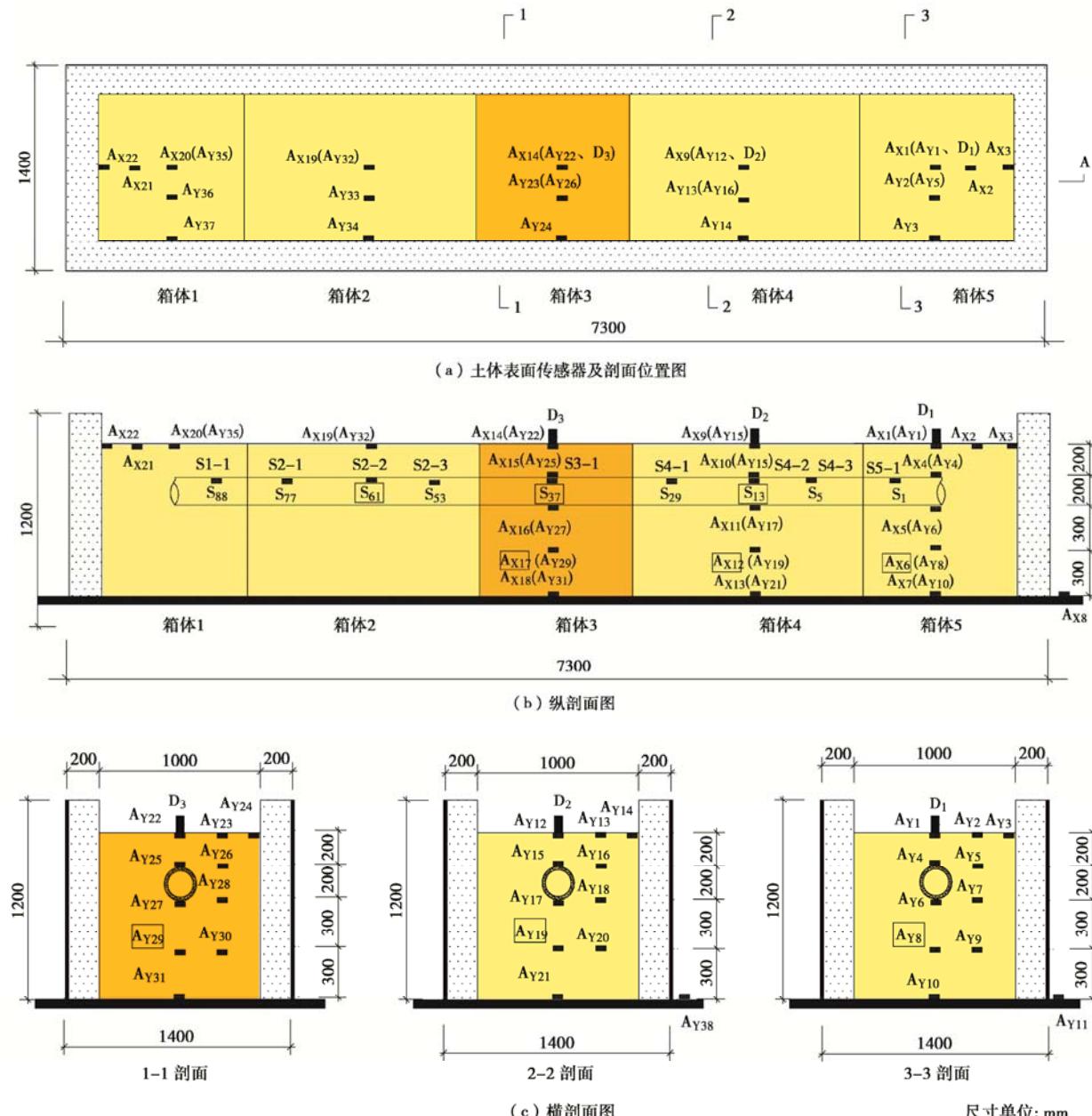


图 2 传感器布置图

Fig. 2 Arrangement of sensors

璃, 以反映埋地管道在地震作用下的变形特性, 测得管道结构的应变响应。

为尽可能准确合理的模拟管土间的相互作用, 避免管土接触面受外置传感器的影响, 同时, 避免应变片受管道外侧土体的干扰及在振动过程中应变片受连接导线拉拽的影响, 在管道内壁试验设计的相应位置处粘贴应变片, 如图 2 (b), (c) 所示。

试验前将有机玻璃长管进行切割, 分别从管的两头引出连接导线, 采用三氯甲烷对分段管道进行黏结; 为保证黏结后管道接口处的强度, 黏结时采用同批次、相同管径、沿长度方向切割一条缝的长 200 mm 有机玻璃管段卡在接口处, 之后用三氯甲烷滴注, 尽量保证连接处沿管周滴注均匀, 如图 3 所示。模型管道长

6.0 m, 直径 150 mm, 厚 2 mm。模型管道的材料参数如表 2 所示。



图 3 有机玻璃管道模型

Fig. 3 Plexiglass pipeline model

试验模型土取自北京地铁 14 号线北工大站 10 m 深的砂土和 14 m 深的粉质黏土。砂土密度为 1740 kg/m³, 天然含水率为 8.78%; 粉质黏土密度为 2180 kg/m³, 天然含水率为 18.3%, 塑限为 21.9%, 液限为 35.0%, 塑性指数为 13.18。模型土体的长宽高为 7, 1, 1 m。均匀场地土体为砂土, 非均匀场地由砂土和粉质黏土相间组成, 粉质黏土置于 3 号箱内, 如图 2 所示。

表 2 模型管道的材料参数

Table 2 Material parameters of model pipelines

属性	密度 (kg·m ⁻³)	拉伸模量/MPa	压缩模量 (kg·m ⁻³)	埋深/mm	管径/mm	壁厚/mm
管道	1200	2844	3570	200	150	2

1.3 试验传感器的布置

非自由场振动台试验的场地包括均匀场地和非均匀场地两类, 不同场地下, 不同地震输入方向(X , Y)下传感器的类型、数量及位置保持一致。试验中使用加速度传感器、位移传感器、电阻应变片、土压力传感器, 采集管道与周围土体的加速度、土体沉降、管道应变及管道与周围土体之间的接触压力。

非均匀场地中传感器的布置如图 2, 4 所示。图中传感器编号 A 代表土体加速度计, MA 代表管道加速度计, MP 代表薄膜土压力计, S 代表应变片, D 代表激光位移计, X 指埋地管道的轴向方向(纵向), Y 指

埋地管道的横截面方向(横向)。布置在 3 号、4 号和 5 号箱体垂直中心线的加速度计可测量土体 X 和 Y 向加速度, 如图 2 (b), 2 (c) 所示。布置在 2 号、3 号和 4 号箱体中的微型加速度计, 如图 4 (d) 所示, 分别布置在管道截面的顶部和底部测量管道 X 和 Y 向加速度, 布置在 3 号和 4 号箱体内管道沿环向上的薄膜土压力计, 如图 4 (a) 所示。布置在 2 号, 3 号和 4 号箱体内管道沿环向上的应变片如图 4 (b) 所示, 布置在 1 号和 5 号箱体内管道上的应变片, 如图 4 (c) 所示。

1.4 试验输入地震动及加载方案

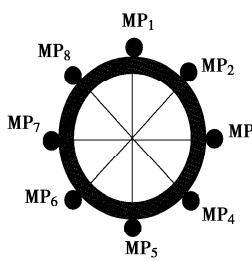
本试验选择有代表性 El-Centro 波(N-S 分量)、Kobe 波(N-S 分量)及北京人工合成地震动作为振动台试验的输入地震动。输入的地震动根据土体的动力相似比, 对输入地震动的时间间隔和峰值加速度进行缩放, 通过设置输入各台阵地震波的时间延迟考虑地震动传播时行波效应的影响, 采用上述相似比计算的台面时间延迟仅为 0.04 s, 为了突显非一致激励的影响, 各台阵输入地震波时间延迟为 1 s。试验时分别输入水平纵向(X)、水平横向(Y)地震动, 采用四级加载(0.25g, 0.5g, 1.0g, 1.55g)形式, 振动台试验加载工况如表 3 所示。加速度时程和傅氏谱如图 5 所示。

表 3 振动台试验加载制度

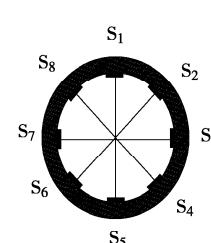
Table 3 Loading sequence of shaking table tests

序号	输入波	加速度峰值/g				备注
		原型		1/10 模型		
		X	Y	X	Y	
1	WN1	0.05	0.05	0.05	0.05	
2, 3, 4	EL1, Kobe1, BJ1	0.10	0.10	0.25	0.25	七度
5	WN2	0.05	0.05	0.05	0.05	
6, 7, 8	EL2, Kobe2, BJ2	0.20	0.20	0.50	0.50	八度
9	WN3	0.05	0.05	0.05	0.05	
10, 11, 12	EL3, Kobe3, BJ3	0.40	0.40	1.00	1.00	九度
13	WN4	0.05	0.05	0.05	0.05	
14, 15, 16	EL4, Kobe4, BJ4	0.62	0.62	1.55	1.55	罕遇地震

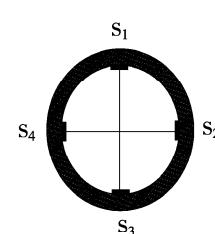
注: EL-EL-Centro 地震动, Kobe-阪神地震动, BJ-北京人工合成地震动, WN-白噪声。



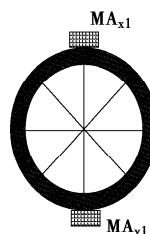
(a) 管周土压力计位置图



(b) 管周应变片位置图1



(c) 管周应变片位置图2



(d) 管道加速度计位置图

图 4 管周传感器布置

Fig. 4 Arrangement of pipe circumference sensors

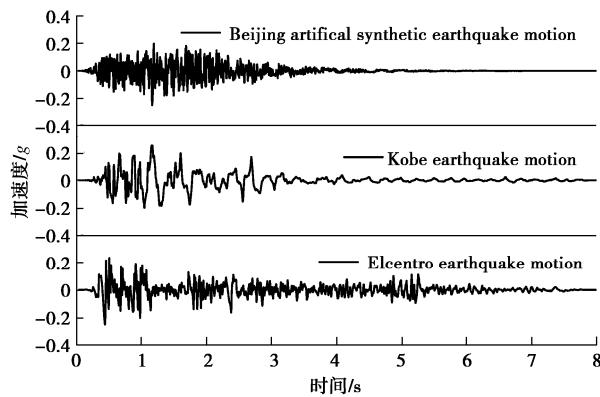


图 5 输入地震动

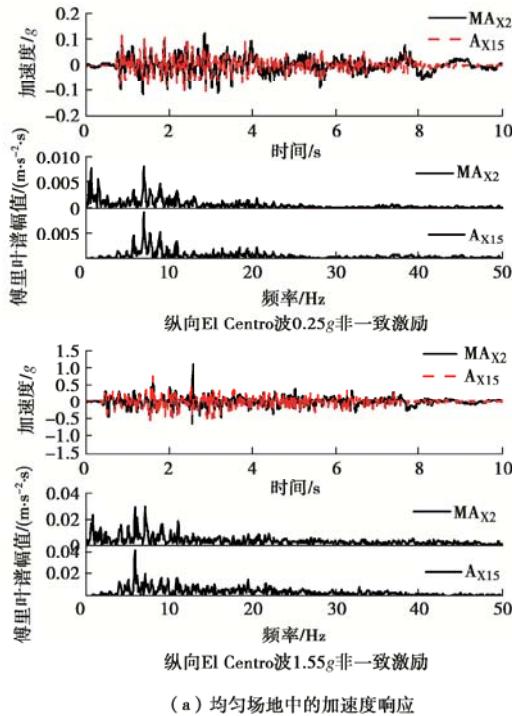
Fig. 5 Applied ground motions

2 试验结果和分析

2.1 管道加速度时程曲线

图 6, 7 是为监测断面 1(3 号箱) 在纵向一致和非一致激励下均匀场地和非均匀场地中监测点 MA_{X2} (管道加速度计) 和 AX₁₅ (管道周围土体加速度计) 的加速度时程及其傅氏谱。

由图 6, 7 可知, 在一致激励作用下, 均匀场地和非均匀场地中管道和周围土体加速度时程的相位和波形较为一致, 此外, 其加速度傅氏谱的频谱组成也较为一致。说明在一致激励作用下, 周围土体对管道的



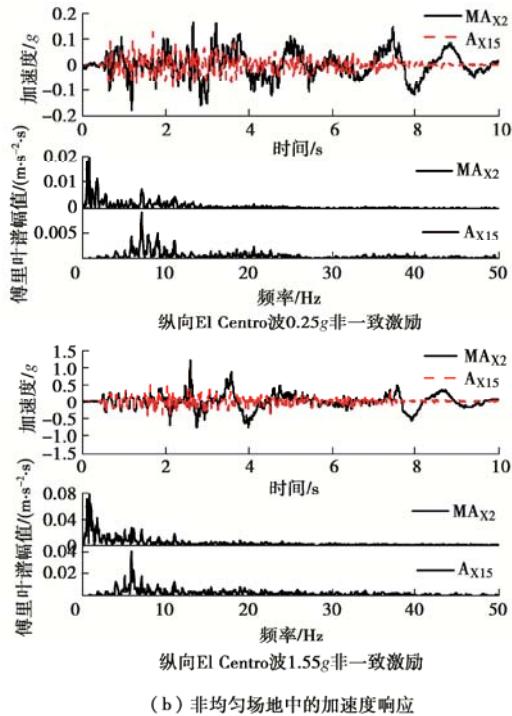
(a) 均匀场地中的加速度响应

约束作用较强, 管道的加速度反应服从于周围土体的加速度反应, 与周围土体加速度反应基本一致。但在非一致激励 0.25g 时, 均匀场地和非均匀场地中管道的加速度反应已出现稍大于土体加速度反应的情况, 随加载等级的增加, 管道加速度反应明显增大, 且其频谱组成丰富, 峰值较多, 中低频成分明显放大, 可能会造成埋地管道的严重破坏。Lee 等^[23]和模型 Yu 等^[24]的研究中也报道了这种强烈的非一致激励作用效应。

2.2 管周应变时程曲线

图 8 是纵向一致和非一致激励加载等级 0.25g 时均匀场地和非均匀场地 3 号箱内管道应变截面 S3-1 监测点 0° 和 180°, 90° 和 270° (自管道顶部顺时针方向) 的应变时程曲线。

由图 8 可知, 在纵向一致、非一致激励作用下, 均匀场地和非均匀场地中管道 0° 和 180°, 90° 和 270° 测量的应变时程的相位和波形基本相同。说明在纵向地震作用下, 沿管道轴向的地震作用使土体产生了受拉或受压变形, 管道被周围土体夹裹随其一起变形, 从而产生轴向的拉、压应变。与一致激励作用相比, 非一致激励作用下管道的应变响应基本上增大两倍左右, 非均匀场地下管道应变峰值比均匀场地下管道的应变峰值更大。非一致激励及场地的非均匀性引起的管道高应变可能会对其造成更严重的破坏。



(b) 非均匀场地中的加速度响应

图 6 一致激励下管道及周围土体的加速度响应

Fig. 6 Acceleration responses of pipelines under uniform excitation

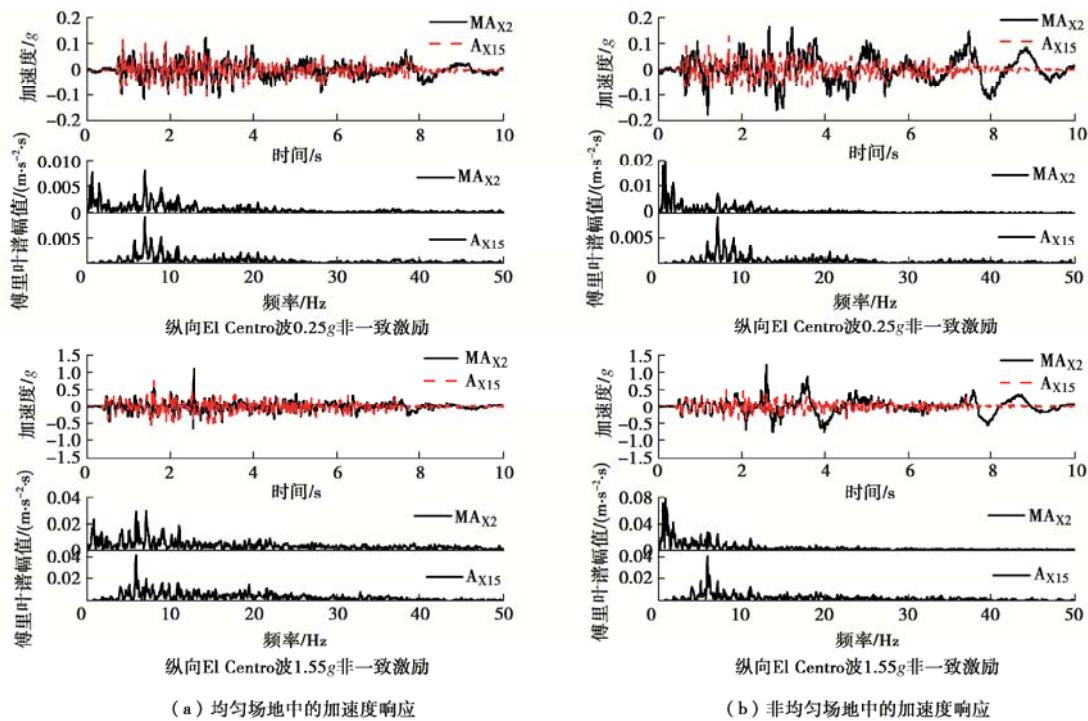


图 7 非一致激励下管道及周围土体的加速度响应

Fig. 7 Acceleration responses of pipelines under non-uniform excitation

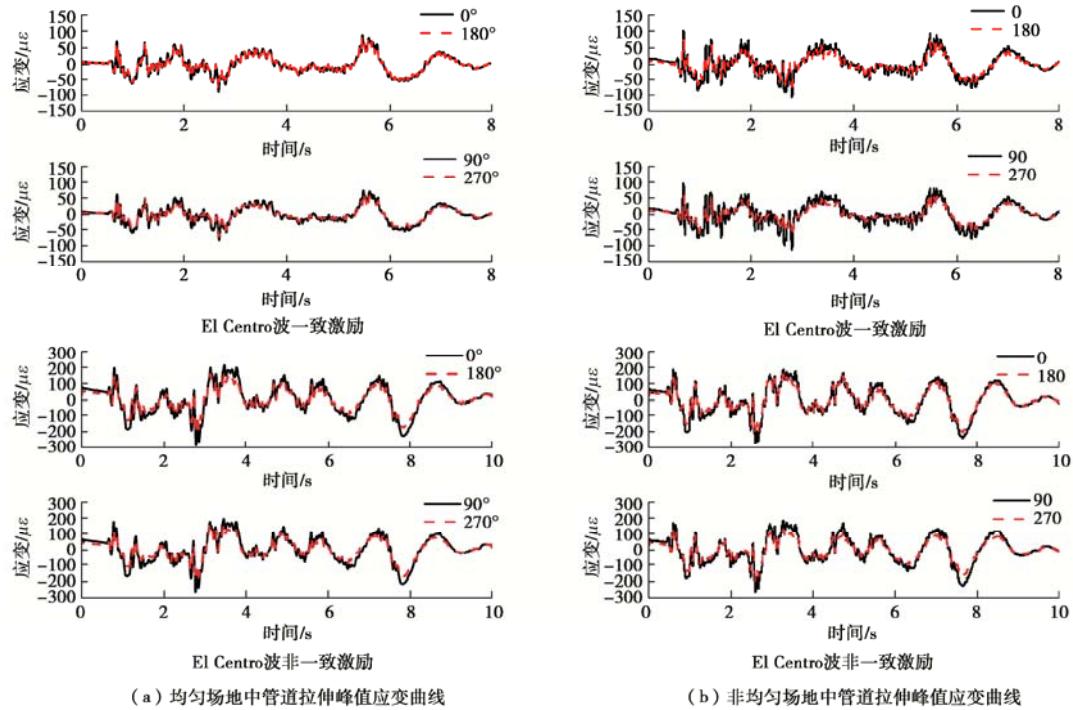


图 8 均匀土与非均匀土中管道的应变响应

Fig. 8 Strain responses of pipelines buried in homogeneous and inhomogeneous soils

2.3 管道轴向应变峰值

图 9, 10 是在一致、非一致激励不同加载等级作用下, 均匀和非均匀场地中沿管道轴向的管道拉、压峰值应变曲线。管道的峰值应变定义为沿管道轴向每个

横截面的平均轴向拉伸和压缩峰值应变。

由图 9, 10 可知, 均匀和非均匀场地中管道轴向峰值拉、压应变曲线相似, 管道拉、压应变峰值随着加载等级的增加而增大。与一致激励均匀场地中埋地

管道的拉、压峰值应变对比发现, 在非均匀场地砂土与粉质黏土的过渡区及粉质黏土中管道截面应变 S2-3、S3-1、S4-1(如图2(b))的峰值应变相对较大, 且随加载等级增加, 增大的幅度变大, 基本上比均匀场地高10%~30%左右。在非一致激励较低加载等级下, 管道峰值应变的大小与均匀场地下相比有所减小, 在较高加载等级下, 峰值应变却急剧增加。

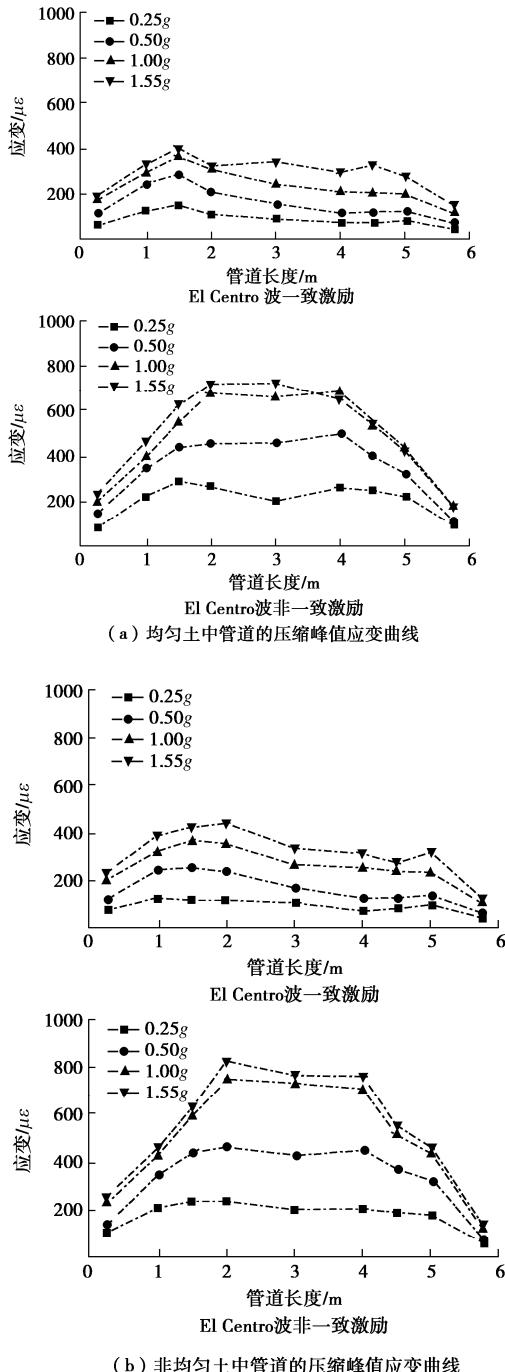


图9 沿管道轴向管道拉伸峰值应变响应

Fig. 9 Tensile peak strains of pipelines along axial direction

在非一致激励作用下, 应变峰值虽随加载强度的增加而增大, 但在加载等级1.55g时振幅的增加幅度减小, 沿管道轴向的管道峰值应变曲线几乎与加载等

级1.0g时相同, 分析在1.0g和1.55g管道拉、压应变较为相近的原因是随加载等级的增加, 管-土接触面逐渐破坏, 管-土间发生滑移, 管-土接触面接近自由状态, 这也符合试验前的预期。

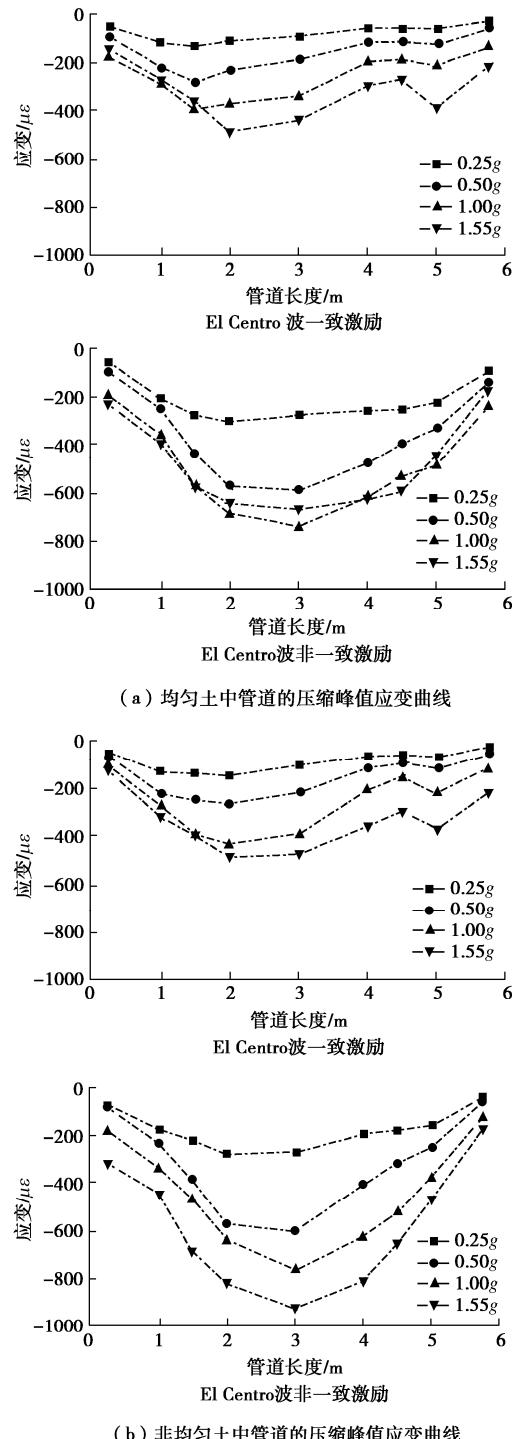


图10 沿管道轴向管道压缩峰值应变响应

Fig. 10 Compressive peak strains of pipelines along axial direction

此外, 在一致激励非均匀场地中管道最大轴向应变峰值出现在不同土体交界过渡区管道应变截面 S2-3处。Kubo等^[25]根据1923年关东地震中输水管道破坏率的定量关系研究表明, 场地的复杂程度对管道

的地震破坏影响很大, 不同土介质的过渡区管道破坏率最高。在非一致激励非均匀场地中管道最大轴向拉伸应变峰值出现在不同土体交界过渡区管道应变截面 S2-3 处, 最大压缩应变峰值出现在粉质黏土中管道应变截面 S3-1 处。Liang^[14-15]通过非均匀场地埋地管道的数值研究表明, 管道在软土中的响应相对较大。

2.4 加载等级与管道轴向应变的关系

图 11, 12 是在一致、非一致激励不同加载等级作用下, 均匀和非均匀场地中埋地管道刚度与管道横截面 S2-3、S3-1、S4-1 轴向峰值应变的关系。

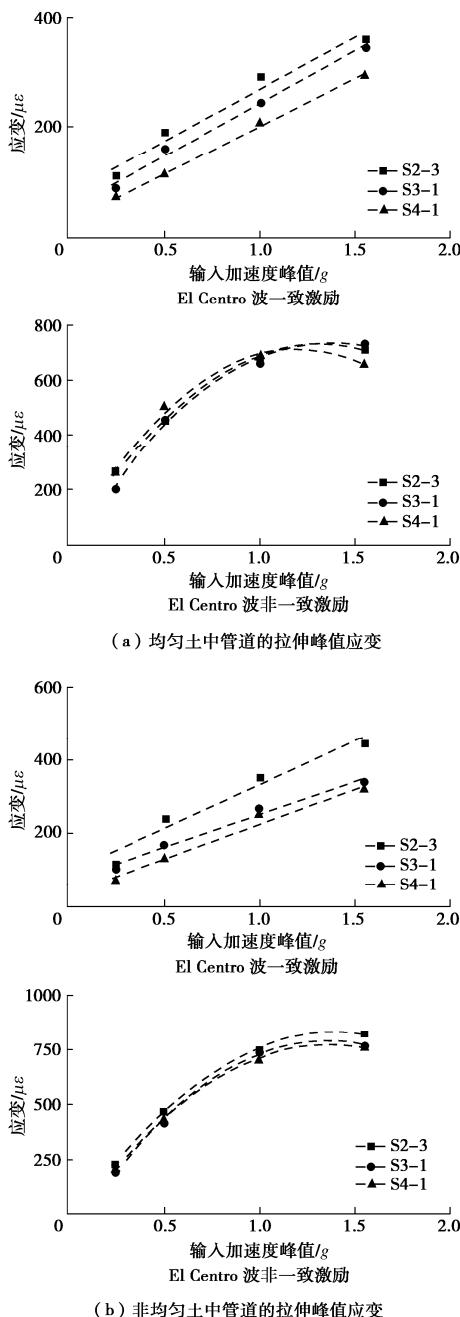


图 11 随加载等级增加管道拉伸峰值应变的变化趋势

Fig. 11 Variation trend of tensile strain of pipelines with loading Intensity

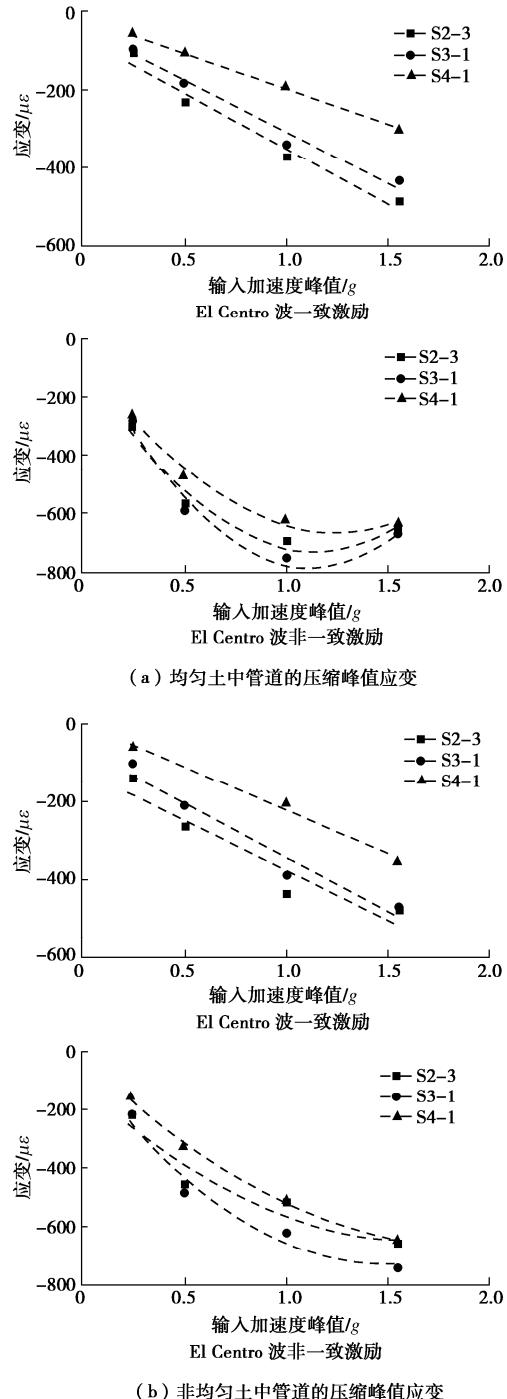


图 12 随加载等级增加管道压缩峰值应变的变化趋势

Fig. 12 Variation trend of compressive strain of pipelines with loading intensity

由图 11, 12 可知, 一致激励作用下, 均匀和非均匀场地中管道的轴向拉伸和压缩应变随着加载等级的增加而增加。有机玻璃管道拉伸、压缩试验显示管道拉伸、压缩应变在 $\pm 10000\mu\epsilon$ 范围内基本呈线性应力 - 应变关系。由此可知, 在一致激励下, 埋地管道轴向应变与加载等级基本呈线性关系。但是在非一致激励下, 均匀和非均匀场地中管道的轴向拉伸和压缩应变随加载等级的增加呈现先增大后减小的趋势, 近似为抛物线的非线性关系。由此可知, 虽然埋地管道

的应变远小于其极限线应变, 但是管道的应力与应变已不再是线性关系。分析出现这种非线性行为的原因是由于非一致激励下土体运动的不一致使土体产生了应变软化反应, 从而引起土体结构发生了较大的变化, 土体对管道的约束能力降低, 管道与土体之间产生了明显的相对运动, 管道上的应变呈增长趋势。但随着管-土接触面破坏的加剧, 管-土间开始进入滑移线性增长阶段, 管道的应变开始进入缓慢线性增长状态。在罕遇地震 $1.55g$ 非一致激励时, 管-土接触剪应力大于土体的临界剪应力, 管-土接触面破坏贯通, 进入完全滑移阶段, 相对位移增长而剪应力不变, 管道应变稳定甚至有所降低。Sim^[26]在跨越走滑断层的埋地管道振动台试验中也观察到类似的管-土非线性相互作用。因此, 在管-土相互作用分析的理论中, 应适当考虑管-土相互作用对埋地管道这种强非线性的影响。

3 结 论

本文对均匀场地(砂土)和非均匀场地(砂土、粉质黏土)中的埋地管道纵向非一致激励振动台试验进行了研究。重点研究了场地的非均匀性对管道应变响应的影响, 得出3点结论。

(1) 在纵向一致激励作用下, 周围土体对管道的约束作用较强, 埋地管道与周围土体的加速度响应基本一致, 非一致激励作用下, 埋地管道的加速度反应明显大于周围土体, 其傅氏谱峰值相对较多, 中低频成分明显放大, 可能会造成埋地管道的严重破坏。

(2) 在纵向一致、非一致激励作用下, 均匀场地和非均匀场地中埋地管道均产生了轴向的拉、压应变。非一致激励下埋地管道的峰值应变比一致激励下增大两倍左右。位于非均匀场地砂土与粉质黏土的过渡区及粉质黏土中的管道应变截面S2-3、S3-1、S4-1的应变相对较大, 最大峰值应变基本上比均匀土中高10%~30%左右, 且最大峰值应变出现在管道应变截面S2-3或S3-1处。这种由非一致激励和场地的非均匀性引起的管道高应变会对其造成更严重的破坏。

(3) 在一致激励下, 管道刚度与应变基本上呈线性关系, 而在非一致地震激励下, 由于管道的应变软化反应以及管-土非线性相互作用的影响, 使得管道刚度与应变呈近似抛物线的非线性关系。因此, 在管-土相互作用的理论分析中, 应考虑管-土的非线性相互作用对管道强非线性特性的影响。

(4) 研究表明, 非一致激励和非均匀场地对管道地震反应影响较大。与一致激励作用相比, 非一致激励下的管道峰值应变增大两倍左右, 与均匀场地相比, 在一致、非一致激励作用下非均匀场地中管道的最大

峰值应变增大约10%~30%, 且管道的峰值应变出现在不同土体交界的过渡区或土质相对较软土体中的管道截面上。因此, 在埋地管线的抗震设计中, 应适当考虑非一致激励、非均匀场地和管-土的非线性相互作用对埋地管道地震响应的影响。

参 考 文 献:

- [1] HALL J F. Northridge earthquake of January 17, 1994: preliminary reconnaissance report[J]. Earthquake Engineering, 1994, **11**(3): 212~215.
- [2] DATTA T. Seismic response of buried pipeline: a state-of-the-art review[J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, **192**(2/3): 271~284.
- [3] KITAURA M, MIYAJIMA M. Geotechnical Aspects of the January 17, 1995 hyogoken-nambu earthquake: damage to water supply pipelines[J]. Soils and Foundations, 1996, **36**(S0): 325~333.
- [4] PSYRRAS N K, SEXTOS A G. Safety of buried steel natural gas pipeline under earthquake-induced ground shaking: A review[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, **106**: 254~277.
- [5] NEWMARK N M, HALL W J. Pipeline design to resist large fault displacement[C]// Proc US Nat Conf Earthquake ENG Ann Arbor, 1975, MI: 416~425.
- [6] TAKADA S, LIANG J W, LI T. Shell model response of buried pipelines to large fault movements[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, **44**(1): 1637~1646.
- [7] 冯启民, 郭恩栋, 宋银美, 等. 跨断层埋地管道抗震试验[J]. 地震工程与工程振动, 2000, **20**(1): 56~62. (FENG Qi-min, GUO En-dong, SONG Yin-mei, et al. Aseismic test of buried pipe crossing fault[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, **20**(1): 56~62. (in Chinese))
- [8] NISHIO N, TSUKAMOTO K. Seismic behavior of a buried pipeline in a non-uniform subsurface layer[C]// Proc ASME PVP Conference, 1985, LA-USA.
- [9] NISHIO N. Earthquake observation of a buried pipeline in a non-uniform ground[C]// Proc the 9th Conference on Earthquake Eng, 1988, Tokyo/Kyoto.
- [10] NISHIO N. Mechanism of seismic strain in buried pipelines based on field observations and model experiments[C]// Proc of 5th Canadian Conference on Earthquake Engineering, 1987, Ottawa: 637~644.
- [11] NISHIO N. Damage ratio prediction for buried pipelines based on the deformability of pipelines and the nonuniformity

- of ground[J]. Journal of Pressure Vessel Technol, 1994, **116**(4): 459 - 466.
- [12] HINDY A, NOVAK M. Earthquake response of underground pipelines[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1979, **7**(5):451 - 476.
- [13] 谢 旭, 何玉敖. 埋设管线穿过不同介质时的地震反应研究[J]. 宁波大学学报, 1988, **1**(2): 117 - 129. (XIE Xu, HE Yu-ao. Study on the earthquake response of buried pipelines laid through different media[J]. Journal of Ningbo University, 1988, **1**(2): 117 - 129. (in Chinese))
- [14] LIANG J W, 3-D seismic responses of pipelines through multiple soil media[C]// Joint American Society of Mechanical Engineering (ASME)/Japan Society of Mechanical Engineering(JSME) Pressure Vessels and Piping Conference, 1995, Honolulu.
- [15] 梁建文. 穿越三种土介质管线的动力分析[J]. 天津大学学报, 1998, **31**(2): 163 - 168. (LIANG Jian-wen. Dynamic analysis of pipelines laid through three-soil media[J]. Journal of Tianjin University, 1998, **31**(2): 163 - 168. (in Chinese))
- [16] 黄忠邦, 高 海, 项忠权. 埋地管线在均匀和非均匀土介质中的地震反应[J]. 天津大学学报, 1995, **28**(1): 55 - 60. (HUANG Zhong-bang, GAO Hai, XIANG Zhong-quan. Research on seismic response in uniform and nonuniform soil medium for buried pipelines[J]. Journal of Tianjin University, 1995, **28**(1): 55 - 60. (in Chinese))
- [17] HAN J Y, EL NAGGAR M H, LI L Y, et al. Design and commissioning of continuous soil box supported on shake tables array for testing long geostructures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, **132**:1 - 13.
- [18] MEYMAND P. Shaking Table Scale Model Tests of Nonlinear Soil-Pile-Superstructure Interaction in Soft Clay[D]. Berkeley: University of California, 1998.
- [19] 杜修力, 韩俊艳, 李立云. 埋地管道振动台试验设计中相似关系的选取 [J]. 防灾减灾工程学报, 2013, **33**(3): 246 - 252. (DU Xiu-li, HAN Jun-yan, LI Li-yun. Selection of shaking table test similarity relations for long-distance buried pipeline[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, **33**(3): 246 - 252. (in Chinese))
- [20] LEE D H, KIM B H, LEE H, KONG J S. Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations[J]. Engineering Structures, 2009, **31**(5):1011 - 1023.
- [21] YU H T, YAN X, BOBET A, et al. Multi-point shaking table test of a long tunnel subjected to non-uniform seismic loadings[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018, **16**(2): 1041 - 1059.
- [22] LIANG J W, SUN S P. Site effects on seismic behavior of pipeline: a review[J]. Journal of Pressure Vessel Technol. 2000, **122**(4): 469 - 475.
- [23] LEE D H, KIM B H, LEE H, KONG J S. Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations[J]. Eng Struct, 2009, **31**(5): 1011 - 1023.
- [24] YU H T, YAN X, BOBET A, et al. Multi-point shaking table test of a long tunnel subjected to non-uniform seismic loadings[J]. Bull Earthq Eng, 2018, **16**(2): 1041 - 1059.
- [25] KUBO K, KATAYAMA T, SATO N. Quantitative analysis of seismic damage to buried pipelines[C]// Proceedings, 4th Japan Earthquake Engineering Symposium, 1975, Tokyo.
- [26] SIM W W, TOWHATA I, YAMADA S. One-g shaking-table experiments on buried pipelines crossing a strike-slip fault[J]. Géotechnique, 2012, **62**(12):1067 - 1079.