

DOI: 10.11779/CJGE202111008

# 横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, 李立云\*, 侯本伟, 高云昊, 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:** 为研究非均匀场地中大直径埋地管道在横向非一致激励下的地震反应, 开展了埋地管道的多台阵振动台模型试验, 分析了在不同地震动强度作用下埋地管道的加速度、应变响应规律。研究表明: 均匀场地和非均匀场地中管道在横向一致、非一致激励下的加速度反应基本上服从于周围土体的加速度反应, 管道主要产生了纵向弯曲变形; 在横向一致激励较高加载等级下, 场地变化过渡区的管道峰值应变相对较大, 相比于均匀场地, 非均匀场地中最大峰值弯曲拉应变高 30%左右, 在非一致激励作用下, 非均匀场地中管道最大峰值弯曲拉应变反而低 30%左右; 在横向非一致激励较高加载等级下, 均匀土中管道的应变响应比一致激励作用下增大两倍左右, 非均匀土中管道的应变响应变化不明显。试验结果可为穿越非均匀场地大直径埋地管道的抗震设计提供参考。

**关键词:** 非一致地震激励; 非均匀场地; 埋地管道; 多台阵振动台试验; 地震响应

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)11-2020-09

**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 transverse non-uniform excitation

HAN Jun-yan, GUO Zhi-ke, LI Li-yun, HOU Ben-wei, GAO Yun-hao, DU Xiu-li

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** A series of multi-point shaking table tests are conducted on model pipelines to investigate the seismic response of pipelines buried in inhomogeneous soil under transverse non-uniform seismic excitation. The acceleration and strain response laws of the buried pipelines under different ground motion intensities are analyzed. The main conclusions are as follows: the acceleration response of the pipelines is basically subjected to the acceleration response of the surrounding soil under uniform and non-uniform excitation. The buried pipelines mainly exhibit longitudinal bending deformation. Under the higher uniform seismic excitation, the peak strain of the pipelines in the transient zone where the soil properties change in the inhomogeneous soil model is larger than that in the homogeneous soil model. The maximum peak strain is basically about 30% higher than that in the homogeneous soil. However, the maximum strain peak is basically about 30% lower than that in homogeneous soil under non-uniform excitation. The strain response of the pipelines in homogeneous soil under the higher non-uniform seismic excitation is almost twice as large as that under uniform excitation, but then the strain response of the pipelines in inhomogeneous soil does not change significantly. The test results can provide a reference for the seismic design of large-diameter buried pipelines passing through inhomogeneous soil sites.

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

## 0 引言

近年来的地震灾害表明, 与地上结构的地震惯性力破坏不同, 地下结构的破坏主要取决于场地土的变形, 场地条件比地震动强度对管道破坏的影响更大<sup>[1-3]</sup>。长输埋地管道在敷设过程中不可避免要穿越多变的场地, 如沉积河谷场地、开挖回填场地以及地质

运动直接形成的多种土介质场地等<sup>[4]</sup>。灾后现场调查

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金项目(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, 51978020)

**收稿日期:** 2021-03-05

**\*通信作者** (E-mail: lly@bjut.edu.cn)

表明<sup>[5-8]</sup>, 相比于均匀场地, 埋设在非均匀场地中管道的破坏率明显更高。因此, 研究管-土结构体系在非均匀场地中的地震反应, 探讨非均匀场地中埋地管道的抗震性能, 具有重要的学术意义和工程价值。

不同的地震动入射方向对长线型地下结构的地震反应影响很大。早期 Hindy 等<sup>[9]</sup>利用管道的集中质量模型研究了地震动沿管道横向、纵向以及不同入射角下管道的响应。结果显示管道中的轴向应力远大于弯曲应力。因此, 纵向地震反应通常被认为是更关键的, 埋地管道的地震响应分析和设计也集中在对结构轴向应变的评估, 忽略了由横向地震动作用引起的结构弯曲应变。然而, Ariman 等<sup>[10]</sup>的研究表明大直径管道存在显著的弯曲应变, 同时指出对大直径管道的地震响应分析仅考虑纵向地震动作用的影响, 结果可能是不适用的。Zerva 等<sup>[11]</sup>研究了随机地震作用下管道的轴向和水平横向的响应。尽管也观察到管道的轴向应变超过了弯曲应变, 但同时也指出对大直径管道, 应考虑纵向、横向地震作用下管道的地震响应。闫孔明等<sup>[12]</sup>开展了非一致激励下埋地管道的振动台试验, 将弯曲应变结果与国内和美国管道规范结果对比, 表明规范设计时弱化甚至忽略了管线弯曲应变, 但是这种做法难以解释管线弯折破坏。虽然许多研究人员考虑了地震动的输入方向问题, 但对于纵向和横向地震动作用下管道地震响应所占的主导地位仍存在争议, 尚未达成共识。且目前的研究多为经验关系、理论和数值探索性分析, 试验研究相对较少。

近年来, 国内外学者相继开展了埋地管道振动台模型试验的开拓性研究。Kawabata 等<sup>[13]</sup>对埋地柔性管道进行了振动台试验, 研究了在环刚度相似的情况下, 厚度对柔性管道动力特性的影响, 利用不同的管道基础考虑场地的变化, 但是不同场地是分开进行的, 无法研究场地变化处管道的动力特性。Jafarzadeh 等<sup>[14]</sup>利用振动台试验研究了不同的加速度幅值、地震动频率、土壤密度, 管道基础条件和振动方向, 对加速度放大系数和管道变形的影响。该试验通过在部分箱体底部放入混凝土基础模拟非均匀场地, 采用简谐波作为输入地震动, 未考虑其非一致激励的影响。

由于地震动传播速度有限, 不可能同时到达长输埋地管道上所有位置, 考虑行波效应的非一致激励是更合理的地震动输入方法。Newmark<sup>[15]</sup>提出地下管道在地震波作用下的分析方法, 考虑行波效应, 略去惯性力的影响和管土间相对位移。Wang 等<sup>[16]</sup>不考虑惯性力和阻尼影响, 提出拟静力方法, 指出地震波相位差对地下管道的影响较大。此外, 已开展的埋地管道研究表明非一致地震激励引起的管道沿线不同的土体

运动, 可能是造成埋地管道失效破坏的重要原因<sup>[17-18]</sup>。鉴于此, 国内学者开展了非一致地震激励下埋地管道的振动台试验。孟海<sup>[19]</sup>首次采用两个独立剪切模型箱, 开展了埋地管道纵向、横向非一致激励振动台试验, 对管-土结构体系的加速度、位移、应变等结果进行分析, 结果表明, 横向地震动作用下, 管道产生了纵向弯曲变形, 应变反应比纵向地震动作用下更大, 管-土之间的滑移更小。但试验中两独立模型箱中间无覆盖土层, 模型土体不连续, 造成了中间部分的管道裸露。Yan 等<sup>[20]</sup>采用独立控制的双台面振动台, 开展了埋地管道三向非一致激励双台面振动台试验研究, 探讨了管道的加速度、应变以及土体加速度等参数的变化规律, 模型土体亦存在不连续的情况。上述虽考虑了非一致激励的影响, 但均未考虑场地非均匀性的影响。

本试验在充分吸取现有振动台试验和理论研究成果对埋地管道结构地震反应认识的基础上, 考虑场地条件、模型结构材料及输入地震动特性等, 针对埋设在非均匀场地中的管道开展了横向一致、非一致激励振动台模型试验。本文对不同场地条件、不同激励方式、不同地震强度作用下埋地管道的加速度和应变等试验数据进行分析, 研究了横向非一致激励下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 试验模型设计

本试验采用自主研发的悬挂式连续体模型箱 (SCMB), 在北京工业大学振动台台阵系统上开展了埋地管道三台阵振动台试验, 如图 1 所示。模型箱的制作考虑 3 个方面。

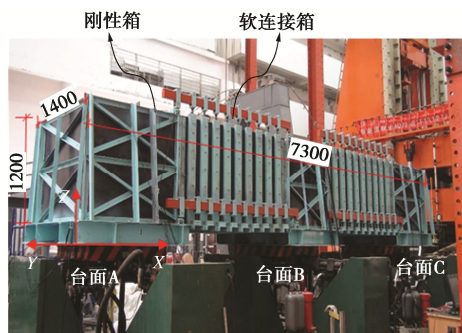


图 1 振动台系统及悬挂式连续体模型箱(mm)

Fig. 1 Shaking table system and suspension continuum model box (mm)

(1) 结构坚固, 连接可靠, 在最大加载等级下模型箱可以稳定地进行试验。

(2) 在考虑振动台系统的承载能力的情况下, 模型箱尺寸可以保证场地土体的连续性和有利于模型管

道的布置。

(3) 模型箱与场地土之间的满足动力试验要求, 模型箱效应不明显; 有利于多点非一致激励加载。

对连续体模型箱空箱基频试验和自由场试验进行了有限元数值模拟, 结果表明所设计连续体模型箱的动力特性和边界效应基本满足试验要求。SCMB 的设计及适用性验证分析详见文献[21]。

试验中管道和土体的相似比基于 Buckingham 定理<sup>[22]</sup>设计。相似关系的确定详见文献[23]。管道和土体的几何相似比  $S_l=1/10$ , 弹性模量相似比  $S_E$  分别为  $1/57$ ,  $1/4$ , 密度相似比分别为  $1/6.5$ ,  $1$ , 应变相似比  $S_\epsilon=1$ , 频率相似比  $S_f=5$ , 加速度相似比  $S_a=2.5$ 。

管道原型为大直径管道, 长 60 m, 直径 1.5 m, 厚 20 mm, 根据几何相似关系, 模型管道长 6.0 m, 直径 0.15 m, 厚 2 mm。为了更好地反映管道在地震动作用下的变形特性, 便于测得管道的应变, 采用模量较低的有机玻璃管。模型管道的敷设如图 2 所示。管道的材料参数如表 1 所示。

表 1 管道的材料参数

Table 1 Material parameters of pipelines						
类型	材质	弹性模量 /GPa	密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	长度 /m	管径 /mm	壁厚 /mm
原型	钢管	210	7800	60	1500	20
模型	有机 玻璃管	3.2	1200	6	150	2



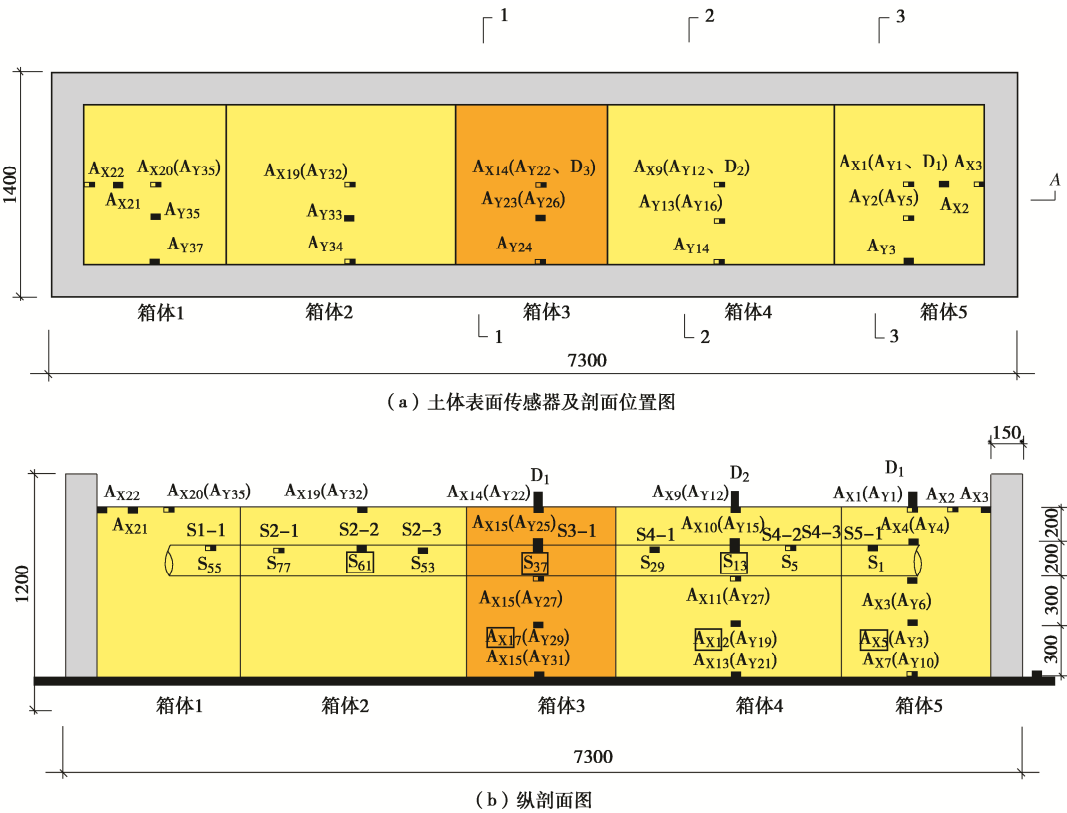
图 2 模型管道敷设示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laying model pipeline

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。土体采用直径 20 cm 的铁锤夯实, 将场地土划分为 3 个区域, 均匀场地土体均为砂土, 非均匀场地两端区域为砂土, 中间区域为粉质黏土如图 3 (a) 所示。

1.2 试验输入地震动及加载方案

为研究输入地震动特性对埋地管道结构地震反应的影响, 本试验选择 El-El-Centro 地震动、Kobe 地震动及 BJ-北京人工合成地震动 3 条地震动记录作为输入地震动, 其频率和峰值根据模型土的相似关系按 5 倍和 2.5 倍进行调整, 如图 4 所示, 为考虑地震动行波效应的影响, 相邻子台的地震动输入延迟设置为 1 s, 在每级加载前进行 WN-白噪声激振, 获取场地的动力特性。振动台试验加载工况如表 2 所示。



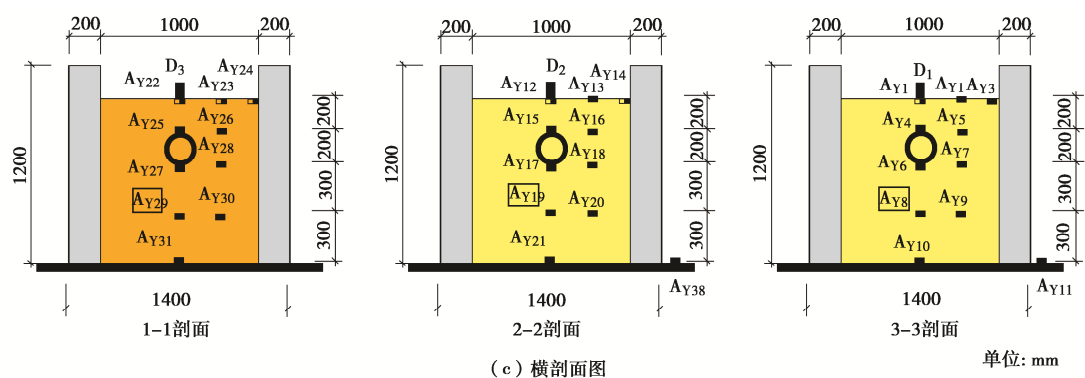


图 3 传感器布置图

Fig. 3 Arrangement of sensors

表 2 振动台试验加载工况表

Table 2 Loading events of shaking table tests

加载等级	地震动	横向加速度峰值/g	
		原型	1/10 模型
扫频	WN	0.05	0.05
一级加载	EL, Kobe, BJ	0.10	0.25
二级加载	EL, Kobe, BJ	0.20	0.50
三级加载	EL, Kobe, BJ	0.40	1.00
四级加载	EL, Kobe, BJ	0.62	1.55

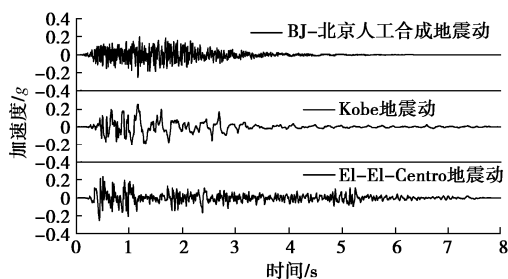


图 4 输入地震动的加速度时程

Fig. 4 Applied ground motions

1.3 试验传感器的布置

非均匀场地中传感器的布置如图 3, 5 所示, 均匀场地中的布置与之一致。图 3 (a) 展示了布置在土体表面的加速度计 (A) 和激光位移传感器 (D); 图 3 (b) 展示了模型管道的 9 个应变监测截面 S1-1—S5-1; 图 3 (c) 展示了布置在#3, #4, #5 箱体垂直中心线的 X 和 Y 向加速度计。图 5 (a) 展示了#3, #4 箱中管道环向布置的薄膜土压力计 (MP); 图 5 (b) 展示了#2, #3, #4 箱中管道环向布置的应变片 (S); 图

5 (c) 展示了#1 和#5 箱中管道环向布置的应变片; 图 5 (d) 展示了布置在#2, #3, #4 箱中管道上的微型加速度计 (MA)。

2 试验结果和分析

2.1 加速度时程曲线

图 6, 7 展示了在横向一致和非一致激励下不同场地下埋地管道 (MA<sub>Y1</sub>) 和周围土体 (A<sub>Y17</sub>) 在监测断面 2 (#4 箱) 的加速度时程和傅氏谱。由图可知, 埋地管道和及其周围土体在不同激励方式, 不同场地条件下的加速度时程曲线都吻合较好。说明横向地震动作用下, 管道主要受周围土体的约束, 其加速度反应基本与周围土体相同。在一致激励作用下, 管道和周围土体加速度傅氏谱的频率分布较为一致, 在较低加载等级下, 非均匀场地中的管道和土体的加速度幅值比均匀场地大 35% 左右。在较高加载等级下, 非均匀场地和均匀场地中管道和土体的加速度反应几乎相同。在非一致激励下, 管道的加速度傅氏谱的频带相比于管周土稍宽, 低频分量放大幅度稍大, 同一加载等级下, 非均匀场地下管道和土体的加速度反应稍小。

2.2 管周应变时程曲线

图 8 展示了 0.5g 加载时, 横向一致和非一致激励下均匀场地和非均匀场地中管道应变截面 S4-2 监测点 0° 和 180°, 90° 和 270° 的应变时程曲线。结果表明, 在所有工况中管道截面 0° 和 180° 测点的应变

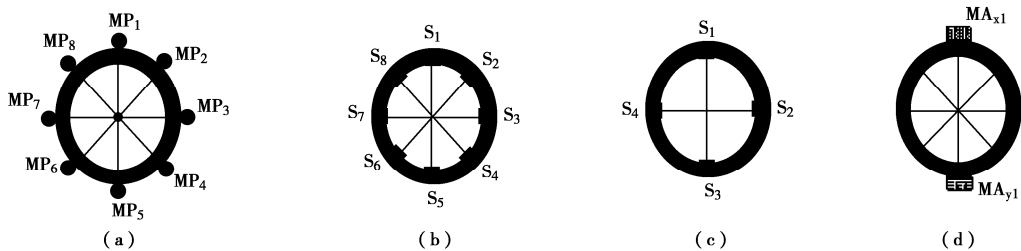


图 5 管道截面传感计布置图

Fig. 5 Layout of sensors of pipeline section

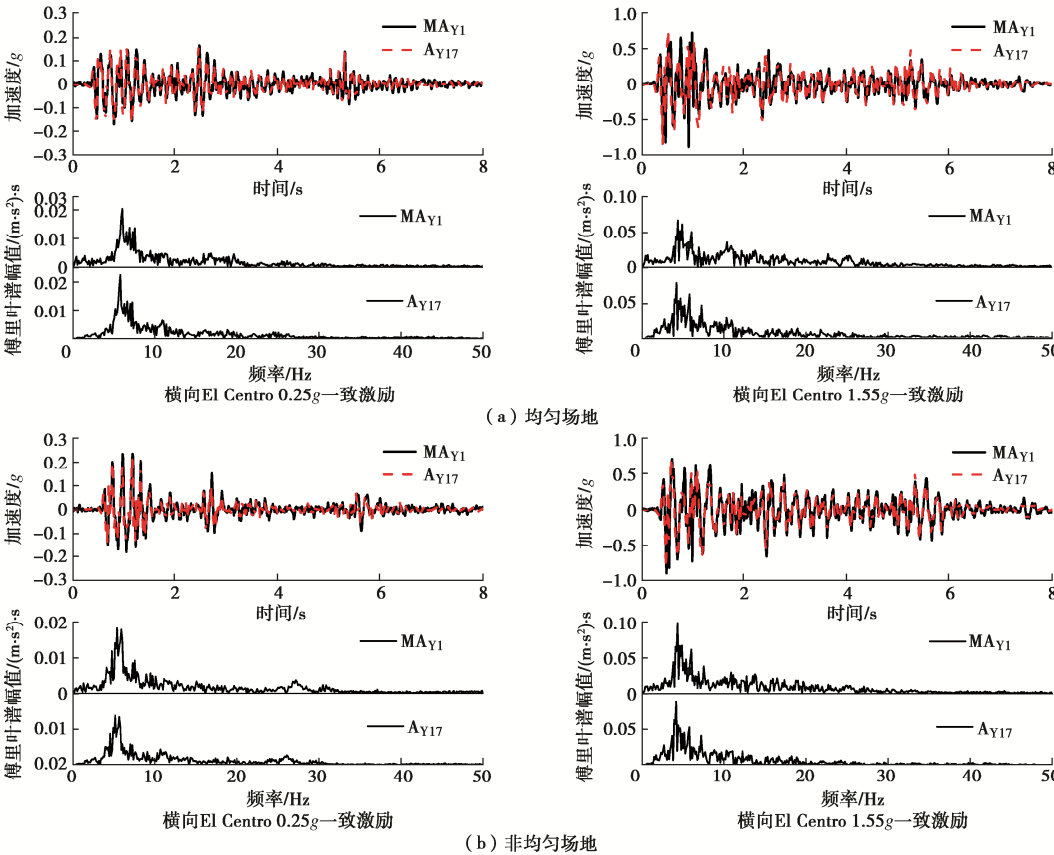


图 6 一致激励下土体与管道的加速度反应

Fig. 6. Acceleration responses of soils and pipelines under uniform excitation

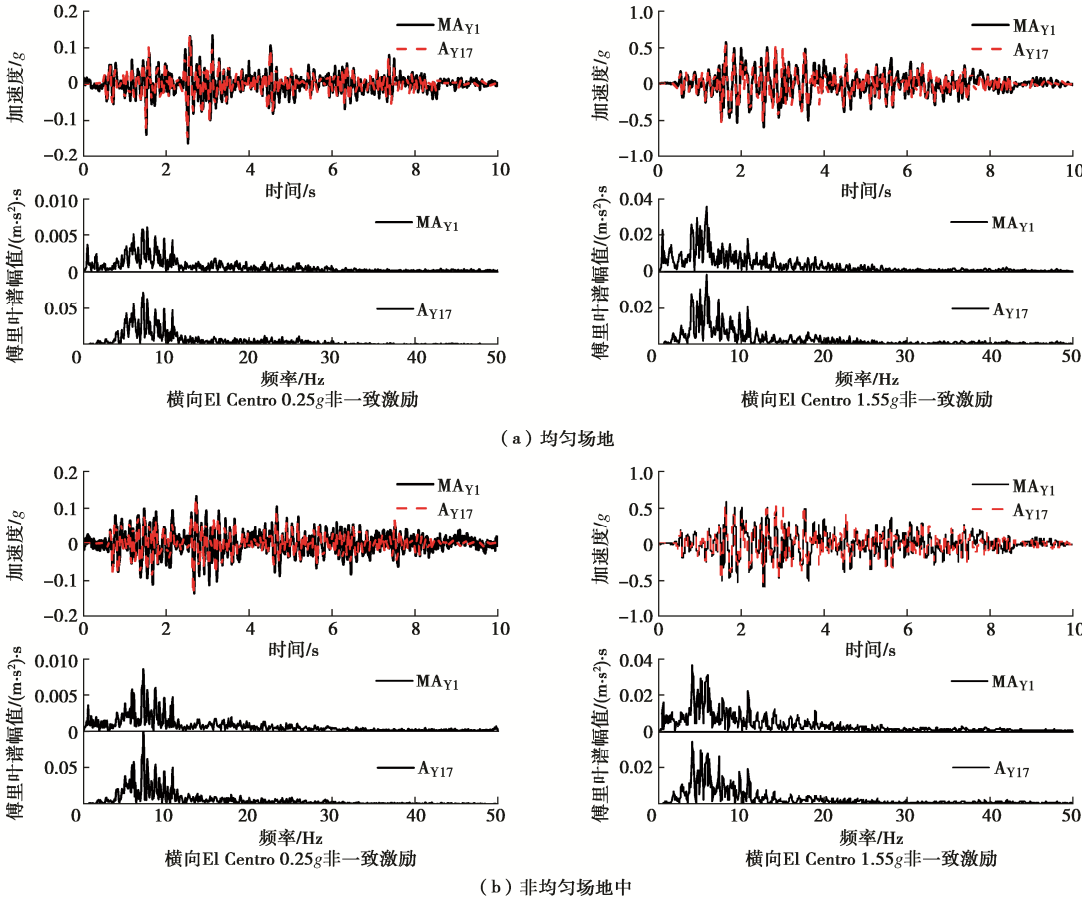


图 7 非一致激励下土体与管道的加速度响应

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

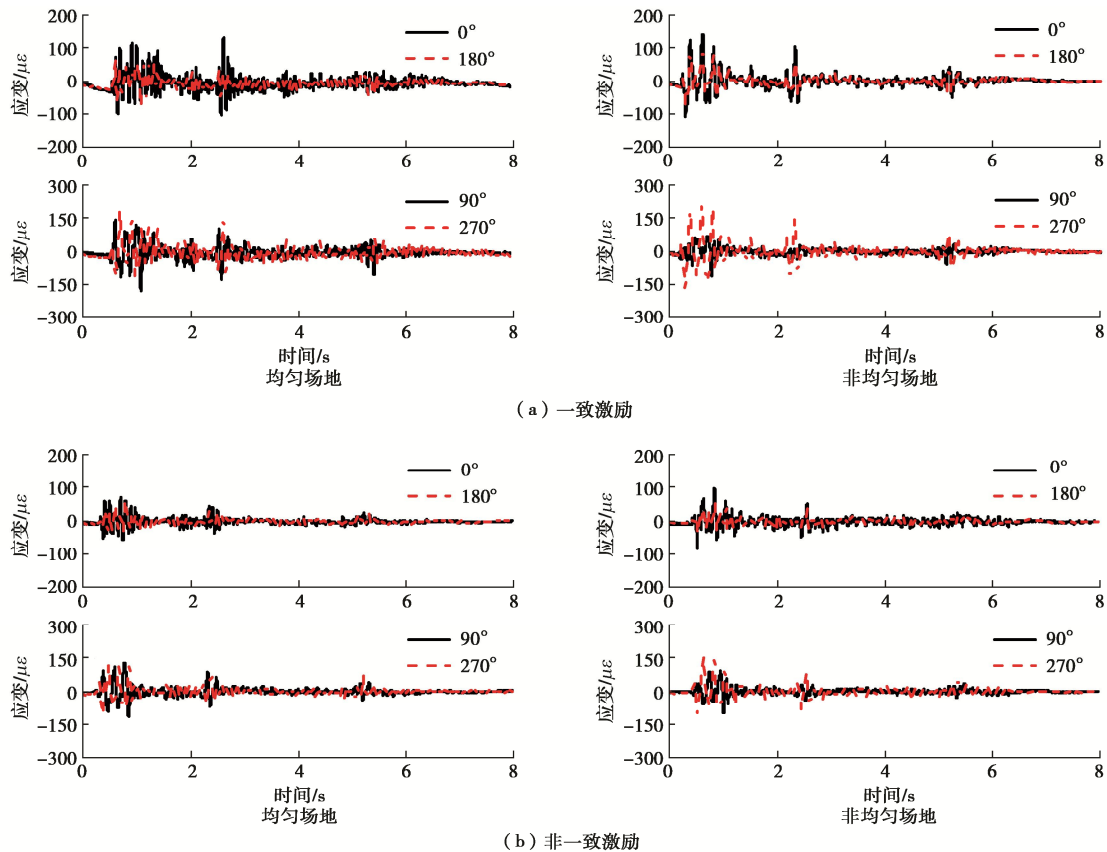


图 8 El Centro 地震动作用下均匀场地与非均匀场地中管道的应变时程曲线

Fig. 8 Time-history curves of strain of pipelines in homogeneous and inhomogeneous soil sites under El Centro excitation

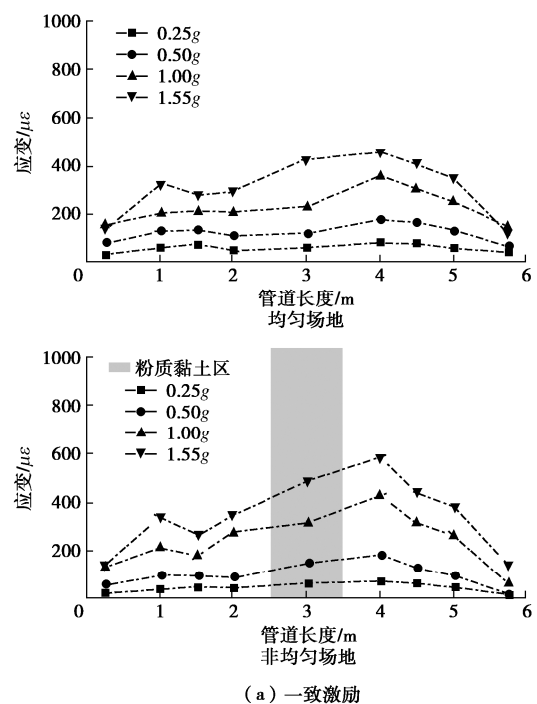
时程的相位和波形基本吻合, 而管道截面  $90^\circ$  和  $270^\circ$  测点的应变时程相位相反。与管道截面  $0^\circ$  和  $180^\circ$  测点的应变响应相比, 管道截面  $90^\circ$  和  $270^\circ$  测点的应变相对较大, 非均匀场地中管道的应变比均匀场地中稍大。与横向一致激励相比, 在加载等级  $0.5g$  非一致激励作用下管道的应变没有明显改变。说明在横向地震动  $0.5g$  作用下, 均匀和非均匀场地中的管道被周围土体包裹随其主要产生了纵向弯曲变形。

### 2.3 管道轴向应变峰值

图 9, 10 展示了均匀和非均匀场地中, 在横向一致、非一致地震动作用下, 管道的纵向弯曲拉、压应变峰值 (每个截面多个测点的拉伸、压缩应变峰值平均值)。

由图可知, 管道拉、压应变峰值曲线在均匀和非均匀场地中沿管道轴向的变化趋势相似, 中间截面 S3-1、S4-1 处管道拉伸、压缩应变峰值较大, 随着加载等级的增加, 管道拉、压应变峰值随之增大, 且增大的速率逐渐变大。在一致激励作用下, 在非均匀场地土质变化过渡区及粉质黏土中 (管道截面应变 S3-1、S4-1) 的拉伸应变峰值比均匀场地中更大, 在  $1.0g$ 、 $1.55g$  加载等级时, 与均匀场地相比, 最大拉应变峰值高 30% 左右, 但其最大压缩应变峰值比均匀土中略小。此外, 在较高加载等级  $1.0g$ 、 $1.55g$  时, 均匀土中管道的应变响应非一致激励比一致激励大两倍

左右。但非均匀土中管道的应变响应变化不明显, 且与一致激励下不同, 在非一致激励较高加载等级  $1.0g$ 、 $1.55g$  时, 最大拉应变峰值比均匀场地低 30% 左右, 且出现在粉质黏土中管道应变截面 S3-1 处。说明在非一致激励和非均匀场地共同作用下管道的地震响应比单一影响因素作用下有所减小。



(a) 一致激励

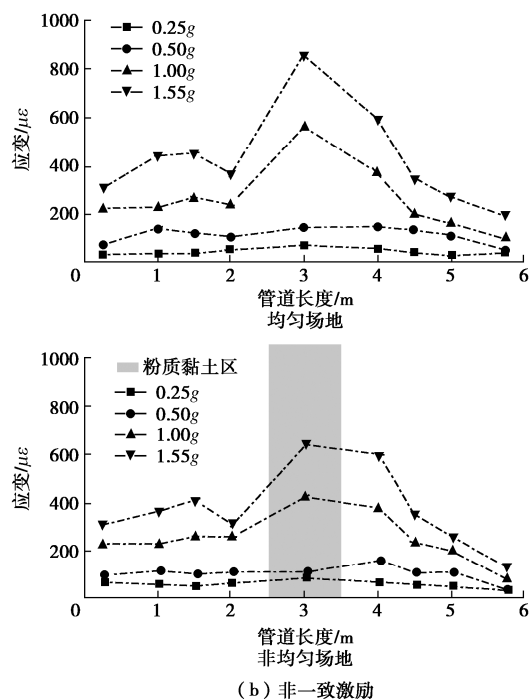


图9 管道拉伸应变峰值沿管道长度的变化曲线

Fig. 9 Curve of peak tensile strain of pipelines along their length

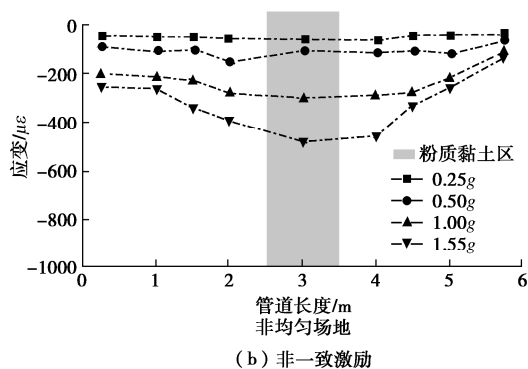
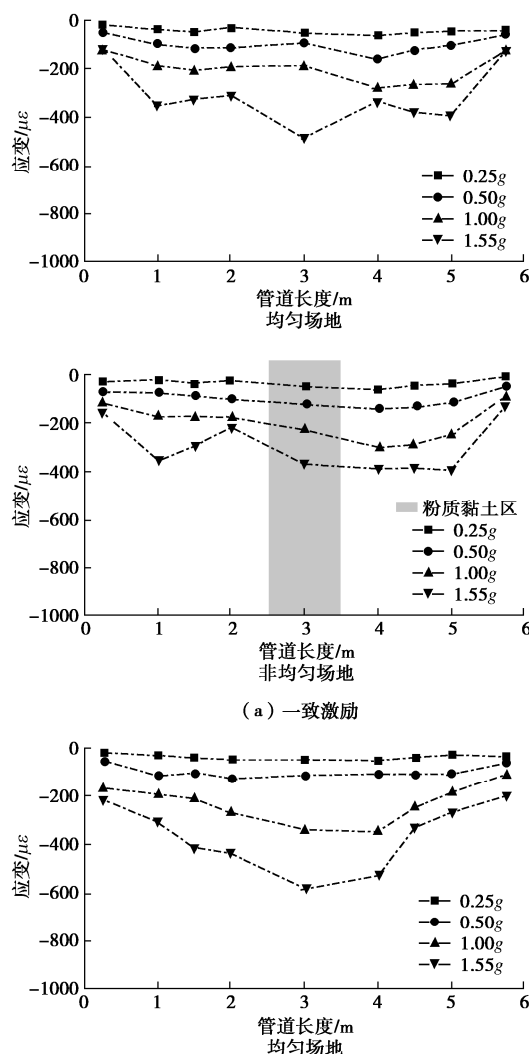


图10 管道压缩应变峰值沿管道长度的变化曲线

Fig. 10 Curve of peak compression strain of pipelines along their length

## 2.4 管道弯曲应变与加载等级的关系

图 11, 12 是管道横截面 S2-3, S3-1, S4-1 纵向弯曲峰值应变随加载等级变化趋势图。

由图 11, 12 可知, 均匀和非均匀场地中埋地管道的纵向拉伸和压缩应变在一致、非一致激励作用下, 随着加载等级的增大基本呈线性增加的趋势。对有机玻璃材料的拉伸、压缩材性试验显示, 在 $\pm 10000 \mu\epsilon$  范围内其应力-应变大致呈线性关系。结合振动台试验结果可知, 在一致、非一致激励作用下, 动应力-应变基本呈线性关系, 埋地管道刚度基本不变, 也说明管道反应基本服从于周围土体的反应, 与 2.1 节中管道加速度反应分析的结论相互印证。在一致激励作用下非均匀场地中的管道的拉伸应力-应变关系曲线的斜率相比于均匀场地明显增大, 说明非均匀场地中埋地管道的拉伸应变对地震等级的增大更加敏感。

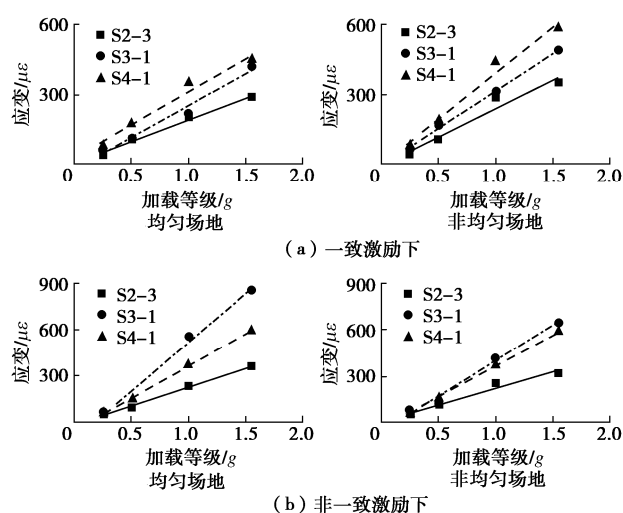


图11 管道拉伸应变峰值随加载等级变化趋势

Fig. 11 Variation trend of pipeline tensile strain with loading intensity

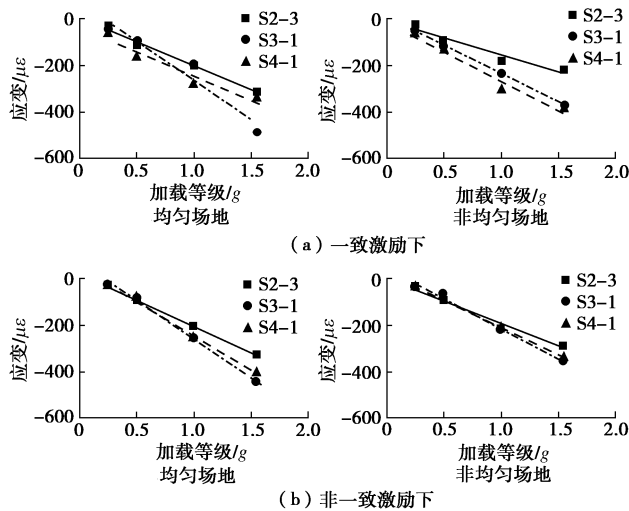


图 12 随加载等级增加管道压缩峰值应变的变化趋势

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

### 3 结 论

本文对横向非一致激励下砂土均匀场地和砂土、粉质黏土非均匀场地中的埋地管道进行了多台阵振动台试验研究, 得到 3 点结论。

(1) 埋地管道在横向一致、非一致激励下管道与周围土体的加速度反应基本一致, 但在非一致激励下, 埋地管道的加速度傅式谱频带稍宽, 低频分量放大幅度稍大。一致激励下, 非均匀场地中的管道和土体的加速度幅值比均匀场地大 35% 左右, 非一致激励下, 非均匀场地下管道和土体的加速度反应反而稍小。

(2) 均匀场地和非均匀场地中, 埋地管道在横向一致、非一致激励下随土体纵向弯曲变形, 产生了弯曲应变, 与均匀场地相比, 非均匀场地中管道的应变明显增大, 但在加载等级 0.5g 非一致激励作用下管道的应变没有明显改变, 非一致激励对管道的应变响应影响较小。

(3) 在较低加载等级下, 地震动激励方式和场地条件变化对管道应变响应的影响较小, 但随加载等级增加二者的影响较为显著, 在只考虑非一致激励或非均匀场地相比于一致激励和均匀场地对管道响应的影响时, 管道的应变都显著增大, 而同时考虑非一致激励和非均匀场地时, 管道的应变响应反而较只考虑单一因素时减小。

#### 参考文献:

[1] SUN S. Earthquake damage to pipelines[C]// 2nd US National Conference on Earthquake Engineering, EERI, Stanford, 1979: 61 - 67.

[2] SUN S. Analysis of seismic damage to buried pipelines in Tangshan earthquake[C]// Proc Earthquake Behavior & Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines & Equipment, New York, 1983.

[3] 孙绍平. 中国地下管道的震害[M]. 北京: 学术书刊出版社, 1990. (SUN Shao-ping. The damage of Chinese underground pipe[M]. Beijing: Academic Books and Periodicals Publishing Company, 1990. (in Chinese))

[4] LIANG J W, SUN S P. Site effects on seismic behavior of pipelines: a review[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2000, 122(4): 469 - 475.

[5] NISHIO N, TSUKAMOTO K. Seismic behavior of a buried pipeline in a non-uniform subsurface layer[C]// Proc ASME PVP Conference, LA, USA, 1985.

[6] NISHIO N. Earthquake observation of a buried pipeline in a non-uniform ground[C]// Proc the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, 1988.

[7] 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, Ottawa, 1987.

[8] NISHIO N. Damage ratio prediction for buried pipelines based on the deformability of pipelines and the nonuniformity of ground[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1994, 116(4): 459 - 466.

[9] HINDY A, NOVAK M. Earthquake response of underground pipelines[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1979, 7(5): 451 - 476.

[10] ARIMAN T, MULESKI G E. A review of the response of buried pipelines under seismic excitations[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1981, 9(2): 133 - 152.

[11] ZERVA A, ANG A H S, WEN Y K. Lifeline response to spatially variable ground motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1988, 16(3): 361 - 379.

[12] 闫孔明, 张建经, 王志佳, 等. 非一致激励下地下管线振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2621 - 2628, 2638. (YAN Kong-ming, ZHANG Jian-jing, WANG Zhi-jia, et al. Shaking table test of underground pipelines under non-uniform excitations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9): 2621 - 2628, 2638. (in Chinese))

[13] KAWABATA T, SONODA Y, MOHRI Y, et al. Dynamic behavior of buried flexible pipes of varying thickness using the shaking table test[C]// Pipelines Conference 2012. August 19-22, 2012, Miami Beach, Florida. Reston, VA, USA:

- American Society of Civil Engineers, 2012: 1015 – 1024.
- [14] JAFARZADEH F, JAHROMI H F, TORGHABEH E A. Investigating dynamic response of a buried pipeline in sandy soil layer by 1g shaking table test[J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2010, **8**(2): 107 – 124.
- [15] NEWMARK N M. Problems in wave propagation in soil and rock[C]// *Proceedings of the International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials*, 1968, Albuquerque.
- [16] WANG L R L, CHENG K M. Seismic response behavior of buried pipelines[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1979, **101**(1): 21 – 30. <https://doi.org/10.1115/1.3454594>.
- [17] 李鸿晶, 王竞雄. 生命线地震工程的若干最新研究进展[J]. *地震工程与工程振动*, 2017, **37**(3): 10 – 26. (LI Hong-jing, WANG Jing-xiong. Recent research advances in lifeline earthquake engineering[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2017, **37**(3): 10 – 26. (in Chinese))
- [18] PSYRRAS N K, SEXTOS A G. Safety of buried steel natural gas pipelines under earthquake-induced ground shaking: a review[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, **106**(19): 254 – 277.
- [19] 孟海. 埋地管线—土动力相互作用非一致激励振动台模型试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2008. (MENG Hai. Buried Pipeline and Soil Dynamic Interaction of Non-Uniform Excitation Shaking Table Model Test Research[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese))
- [20] YAN K M, ZHANG J J, WANG Z J, et al. Seismic responses of deep buried pipeline under non-uniform excitations from large scale shaking table test[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, **113**(19): 180 – 192.
- [21] 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**(21): 1 – 13.
- [22] MEYMAND P. Shaking Table Scale Model Tests of Nonlinear Soil-Pile-Superstructure Interaction in Soft Clay[D]. Berkeley: University of California, 1998.
- [23] 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))