

文章编号:1673-9469(2021)04-0067-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.04.010

悬空管道地震响应试验研究

邵磊¹, 余成¹, 卢松梅¹, 张虎², 黄子川², 袁洪强^{2*}

(1. 葛洲坝城北快速路投资建设有限公司,湖北荆州 434001;2. 长江大学城市建设学院,湖北荆州 434023)

摘要: 为研究地震作用下悬空管道的动力响应,设计并制作简易悬空管道试验装置,开展2种加载工况下9根管道的拟动力试验,研讨悬空长度、埋深及管径等因素对悬空管道地震响应的影响。研究表明:在地震荷载作用下,以管道悬空段中心为对称轴,管道应变近似反对称分布在管道的两侧,且管道的峰值应变出现在悬空管道的悬空段与土体交界处附近;在大位移条件下,管道峰值应变随管道悬空长度的增大而增大,随管径的增大而减小,随埋深的增大而减小。

关键词: 悬空管道;地震响应;应变分布

中图分类号: TE973

文献标识码: A

Experimental Study on Seismic Response of Suspended Pipeline

SHAO Lei¹, YU Cheng¹, LU Songmei¹, ZHANG Hu², HUANG Zichuan², YUAN Hongqiang^{2*}

(1. Gezhouba Chengbei Expressway Investment and Construction Co., Ltd., Jingzhou, Hubei 434001, China;
2. School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China)

Abstract: In order to study the seismic response of suspended pipelines under earthquake, a simple test device for suspended pipelines was designed and manufactured. Pseudo dynamic tests of nine pipelines under two acceleration conditions were carried out to study the influence of suspended length, buried depth and pipe diameter on the seismic response of suspended pipelines. The consequences indicate that: Under the seismic load, the strain of the pipe is approximately anti-symmetrically distributed on both sides of the pipe with the center of the overhanging section as the symmetry axis, and the peak strain of the pipe appears near the junction of the overhanging section of the pipe and the soil body; under the large displacement condition, the peak strain of the pipe increases with the increase of the overhanging length, decreases with the increase of pipe diameter, and decreases with the increase of burial depth.

Key words: suspended pipeline; seismic response; strain distribution

当前国内在油气运输领域广泛利用长输管道的方式为不同的区域提供必要的能源^[1-3]。然而管道服役在复杂的地质环境中时,容易遭受各种地质灾害的侵害,造成管道意外悬空。在地震荷载作用下,悬空管道比埋地管道更容易产生局部变形甚至破坏。因此,研究悬空管道在地震作用下的地震响应具有现实意义与价值^[4-6]。近年来,国内外对悬空管道地震响应的研究主要从理论与数值模拟两个方面开展。在理论研究方面,

Hindy 等^[7]基于管道集中质量模型,并假定土体由两种具有均匀或垂直边界分离的土体组成的基础上,建立静态和动态连续理论,研究行波对管道的弯曲和轴向应力的影响,分析结果可知,考虑管-土相互作用能有效降低均匀介质中管道的应力;王海波等^[8]重点探讨处于半无限空间弹性介质内的管-土相互作用,并在研究过程中引入边界单元法,研究结果表明,当管道埋深越大时,相互作用的程度会逐渐降低;在一定的地震波频率内,埋地管道

收稿日期:2021-07-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778064)

作者简介:邵磊(1984-),男,湖北天门人,硕士,工程师,主要从事市政工程施工技术研究。

* 通讯作者:袁洪强(1988-),男,湖北荆州人,博士,工程师,主要从事结构健康监测研究。

不会发生明显的共振反应,反而由于管-土相互作用致使管体位移减小。其后武立伟等^[9-11]进一步开展研究,推动悬空管道的地震响应理论研究渐趋完善。在数值模拟方面,盖丽华^[12]综合考虑几何以及材料非线性等因素,利用 ABAQUS 建立管道的实体非线性接触模型来研究埋地管道在大位移作用下的受力反应。研究表明:埋地管道在大位移作用下,管道呈现出显著的非线性特征。廖恒等^[13]针对悬空管道的动力响应特征进行了深入研究,并通过 ABAQUS 软件进行了数值模拟,探讨了不同因素对悬空管道动力响应的影响,研究表明,在地震荷载作用下悬空长度和管径对山地悬空管道的动力响应影响最大。雷震等^[14]利用 ABAQUS 有限元软件对悬空长输管道在地震荷载作用下的应力状况和变形特征进行研究,分析了不同参数对悬空管道地震响应的影响,研究成果能够为悬空管道的维护以及管理提供一定的参考依据。

国内外在悬空管道地震响应理论研究方面已经较为成熟,但理论研究通常基于各种假设,且较多理论研究参数取值过于保守,与实际工程有一定差异。数值模拟研究虽然能够通过合理建模来模拟实际工程中悬空管道的地震响应,但需要试验的论证才能使所得结论具有说服力,而悬空管道地震响应试验研究相对较少。因此,本文以悬空管道为研究对象,通过缩尺试验的方法,研究在地震荷载作用下悬空管道的响应规律。

1 试验

1.1 试验设计

本次试验的目的是对悬空管道进行拟动力试验,模拟地震对管道的作用,通过对不同的试件在不同加载工况下的应变反应进行分析,研究悬空长度、埋深及管径等不同因素对悬空管道地震响应的影响。本试验基于弹性相似律和重力相似律这两种在结构模型试验中常用的相似律^[15-16],同时参考文献[17-19]确定模型试验的相似比关系为 1:15,从而设计出 9 根悬空管道试件,试件分组见表 1。管道尺寸分别为 32 mm×2 mm 和 42 mm×2 mm,管道随悬空长度的不同将其长度设置为 3 000、4 000、5 000 mm。本次试验对实际工程中的悬空管道进行简化,简化模型如图 1 所示。由此,完成了悬空管道试验装置的设计,其基本结构

可以参考图 2,试验装置由两个土箱(长×宽×高为 1 500 mm×1 000 mm×1 100 mm)和一个错动盘组成。

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of specimen

试件编号	悬空长度/mm	管径/mm	埋深/mm	壁厚/mm	管长/mm
S-1	1 500	32	300	2	3 000
S-2	1 500	32	600	2	3 000
S-3	1 500	42	300	2	3 000
S-4	1 750	32	300	2	4 000
S-5	1 750	32	600	2	4 000
S-6	1 750	42	300	2	4 000
S-7	2 000	32	300	2	5 000
S-8	2 000	32	600	2	5 000
S-9	2 000	42	300	2	5 000

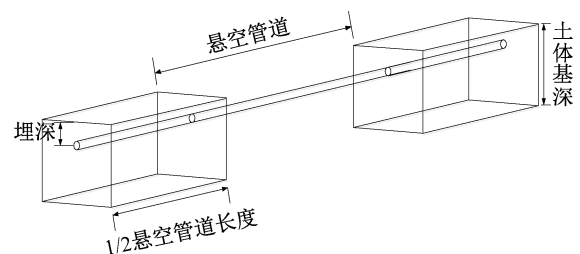


图 1 简化模型图

Fig. 1 Simplified model drawing

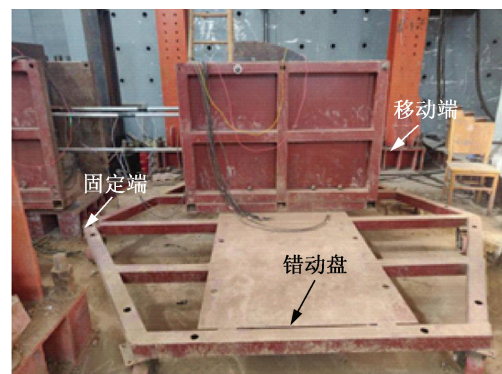


图 2 试验装置图

Fig. 2 Diagram of the test device

1.2 材料材性

试验土体为粉质黏土,对土体取样进行三轴压缩试验得出其性能参数见表 2。试验管道为镀锌管道,其力学性能如表 3 所示。

表 2 土样参数

Tab. 2 Mechanical properties of soil samples

土壤类别	天然密度 /(g·cm ⁻³)	含水 率/%	内摩擦 角/(°)	凝聚力 /kPa
粉质黏土	1.88	26.80	7.80	35.50

表 3 管道力学性能
Tab. 3 Mechanical properties of pipes

管道规格 / (mm×mm)	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	泊松比
Φ42×2	290.70	386.10	2.02×10 ⁵	0.30
Φ32×2	283.50	374.30	2.03×10 ⁵	0.30

1.3 试验量测与加载

本试验采用拟动力加载方式,通过作动器给振动台施加位移从而使两个箱体产生相对错动,以实现悬空管道在地震作用下的大位移条件加载。试验采用天津波加载,试验加载工况见表 4。试验采集系统主要由 DH5908 动态应变采集仪、INV9828 传感器及 DASP 软件构成,详见图 3。试验量测采用电阻式应变片,管道跨中截面布置 2 个应变片,管道悬空段和埋土段交界处对称布置 16 个应变片,同时定义靠近 MTS-液压加载系统的管侧为管前,管道右侧测点距离跨中截面的距离为正,详见图 4。

表 4 试验加载工况
Tab. 4 Test loading conditions

工况数	波形	幅值/mm	加速度/g
1	天津波	67.50	0.15
2	天津波	90.00	0.20

2 试验结果与分析

2.1 悬空长度的影响

为了研究不同悬空长度对悬空管道地震响应的影 响,对 S-2、S-5、S-8 三根试件进行 2 种工况下的加载试验,绘制图 5—图 7 的三根试件在不同加载工况下的管道各测点应变分布图。从图中可以看出,在地震荷载作用下,以管道悬空段中心为对称轴,管道应变呈反对称分布在管道的两侧,管道的峰值应变出现在悬空管道的悬空段与土体交界处附近。改变悬空长度对悬空管道应变分布趋势几乎无影响,但对管道峰值应变出现的位置有影响。将管道的应变峰值与悬空长度的关系绘制出曲线,如图 8 所示。由图可知,悬空长度由 1 500 mm 增加到 1 750 mm 时,管道的峰值应变增大明显,悬空长度由 1 750 mm 增加到 2 000 mm 时,峰值应变增加的幅度降低,峰值应变整体上随着悬空长度的增加而增加。此外,随悬空长度的增加,改变加速度工况,对管道的峰值应变影响较小。这是因为天津波加载工况对应着大位移条件,随悬空长度的增加,管道的侧向变形会增加,导致管道的拉压应变值的增加。

2.2 埋深的影响

为了研究不同埋深对悬空管道的影响,对

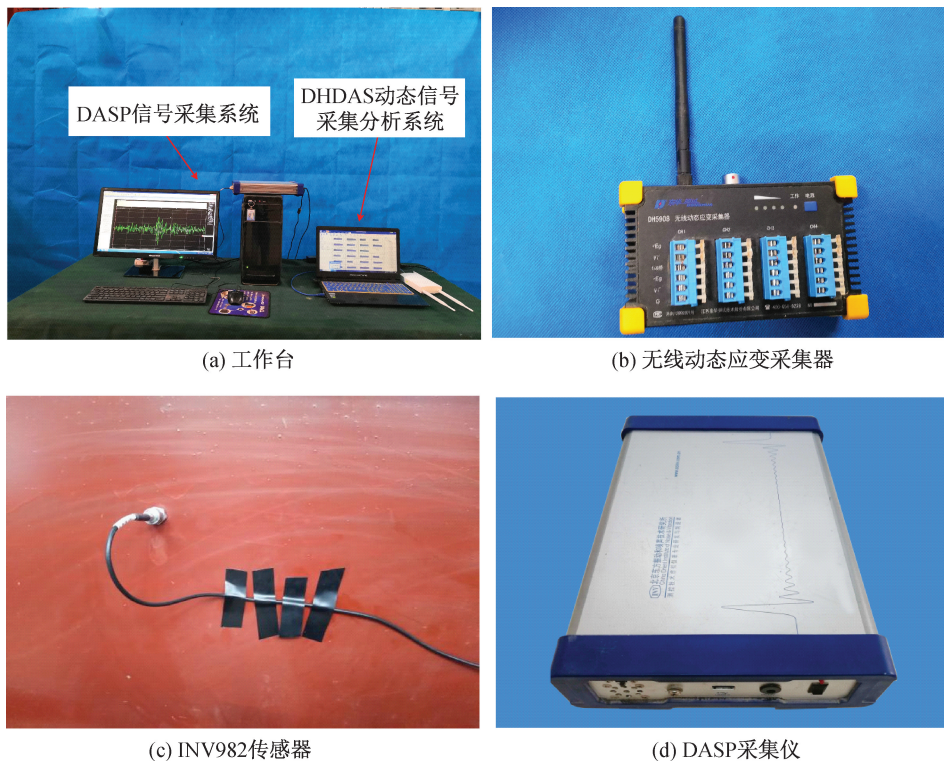
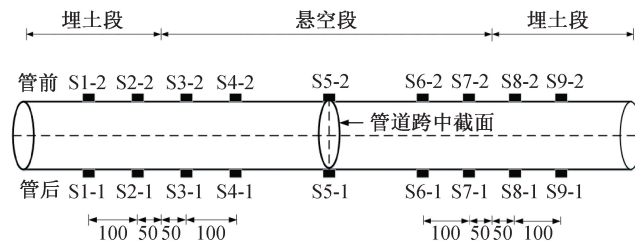
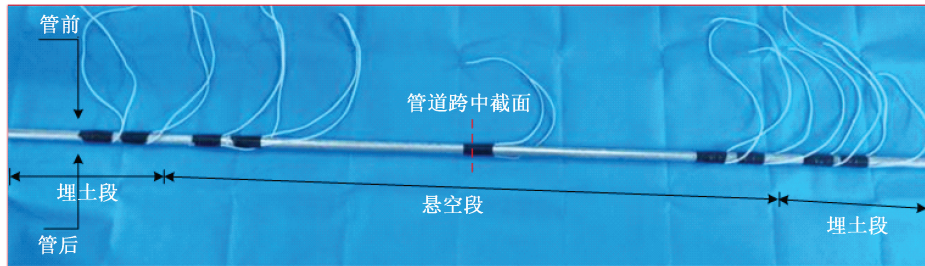


图 3 试验测量系统

Fig. 3 Test measurement system



(a) 应变片平面布置图 (单位: mm)



(b) 管道应变测点照片

图4 应变片布置图

Fig. 4 Strain gauge layout

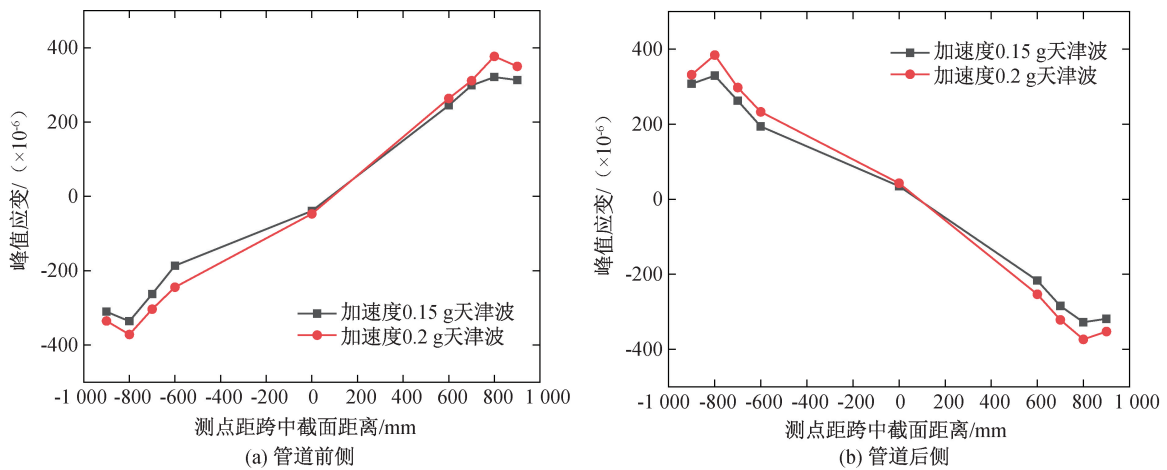


图5 试件 S-2 在工况 1、2 沿管轴应变分布

Fig. 5 Strain distribution along the tube axis of specimen S-2 under working conditions 1 and 2

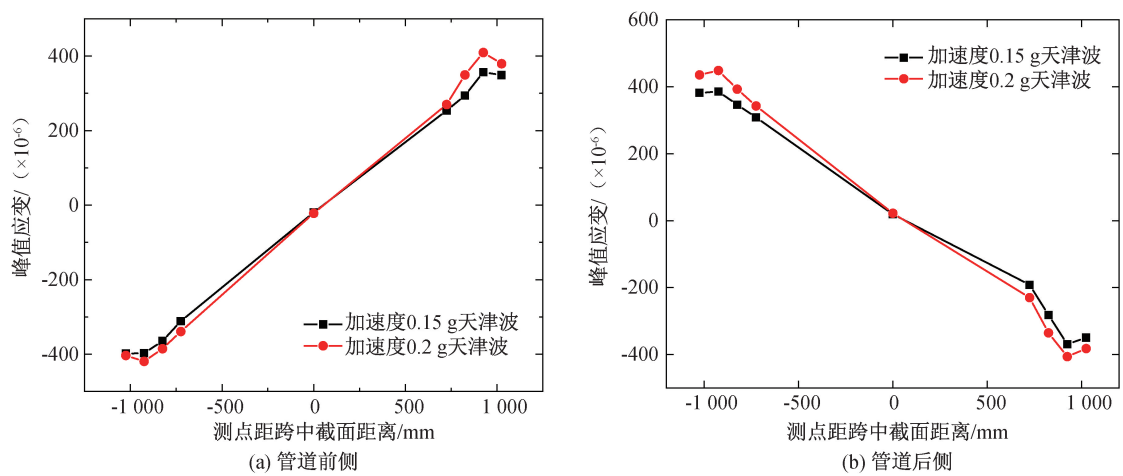


图6 试件 S-5 在工况 1、2 沿管轴应变分布

Fig. 6 Strain distribution along the tube axis of specimen S-5 under working conditions 1 and 2

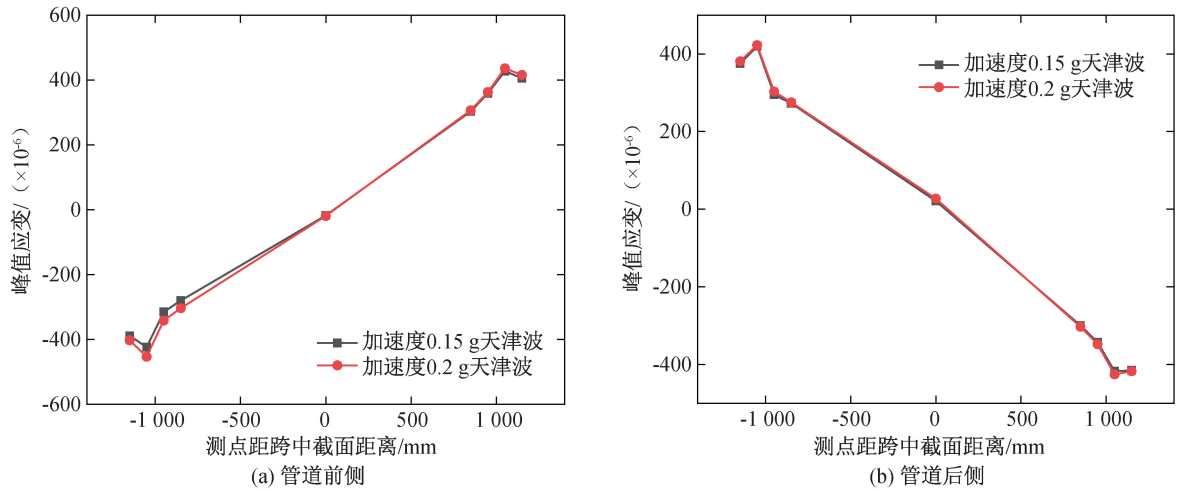


图 7 试件 S-8 在工况 1、2 沿管轴应变分布

Fig. 7 Strain distribution along the tube axis of specimen S-8 under working conditions 1 and 2

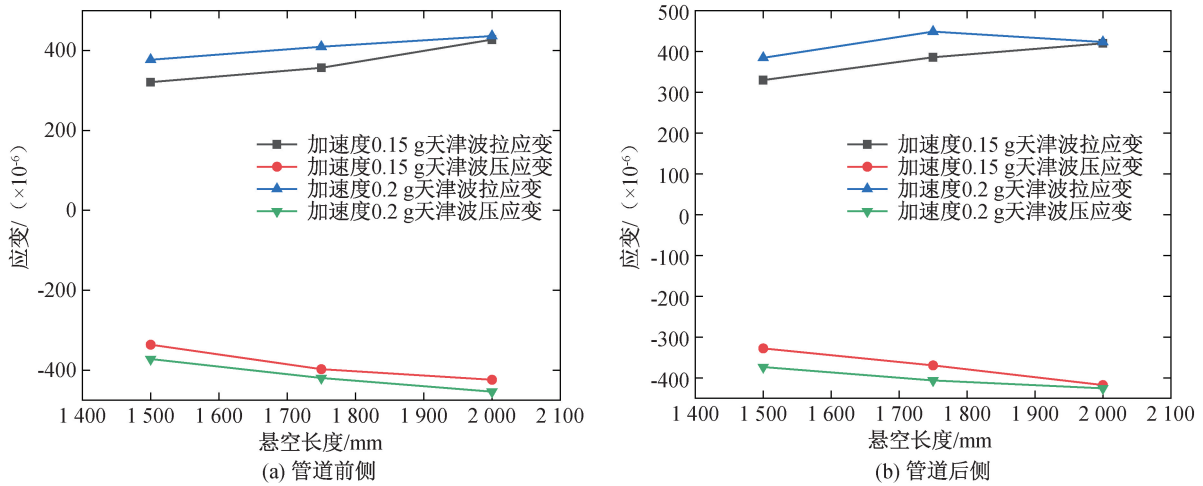


图 8 悬空长度与管道应变关系

Fig. 8 Relationship between suspended length and pipeline strain

300 mm 和 600 mm 两种埋深的试件进行 2 种加载工况下的试验。将在 2 种加载工况下管道应变峰值与埋深的关系绘制成曲线,如图 9 所示。由图可知,相同悬空长度条件下,埋深由 300 mm 增加到 600 mm,管道的峰值应变明显增大。同时改变悬空长度,对管道的峰值应变随着埋深增加的趋势几乎无影响。这是由于埋深的增加导致土体作用在管道上的土压力和摩擦力增加,管道周围土体对管道的约束作用增强,是管道的峰值应变增大。

2.3 管径的影响

为了研究不同管径对悬空管道的影响,对 32 mm 和 42 mm 两种直径的试件进行 2 种加载工况下的试验。将在 2 种加载工况下管道应变

峰值与管径的关系绘制成曲线,由图 10 可知,相同悬空长度下,管道的峰值应变随管径的增大而降低,但应变增加幅度逐渐降低。这是由于管道直径的增加,管道的截面惯性矩随之增大,管道刚度增加,管道截面抵抗变形的能力增强,所以管道的应变反应减小。此外,管径的增大虽然也会增加管道与土壤的接触面积,导致管道周围土体对管道的约束作用增大,但管径变较小时这一部分土体的约束相较于管道刚度变化的影响较小。

3 结论

1) 在地震荷载作用下,随着埋深的增大,管道周围土体对管道的约束作用增强且管道受到的摩

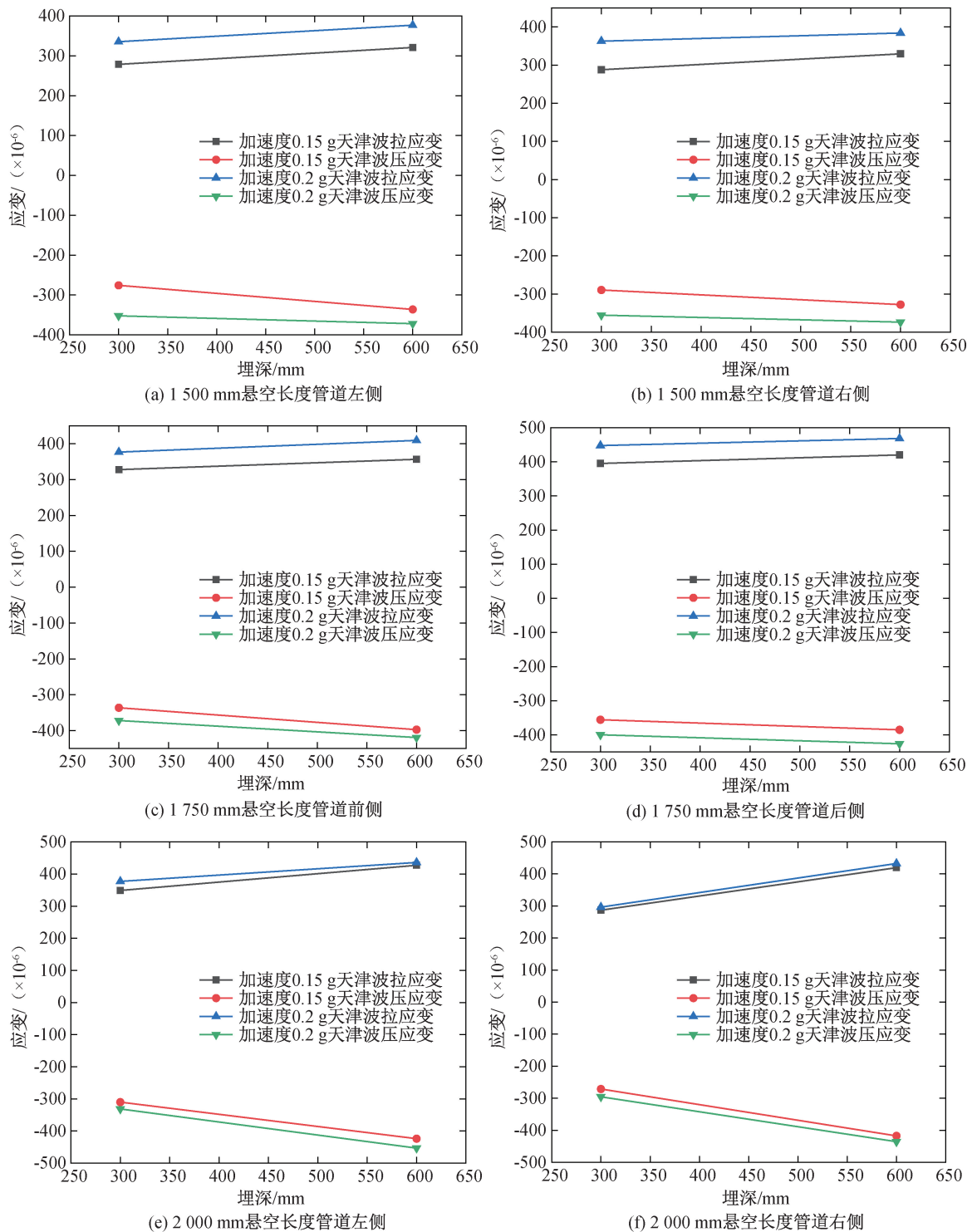


图9 埋深与管道应变关系

Fig. 9 Relationship between buried depth and pipeline strain

摩擦力增大,从而限制了管道位移,导致管道的峰值应变大。因此,在实际施工中,管道选择浅埋,会使悬空管道在地震荷载作用下不易破坏。

2)在大位移条件下,随悬空长度的增加,管道的峰值应变随之增大。管道工作在容易发生横向

大位移的服役环境时,应当降低悬空长度来保证管道的安全运行。

3)随着管径的增加,管道的峰值应变呈现出减小的趋势,并且在不同的悬空长度下,应变的反应规律也保持一致。在实际工程施工过程中,应

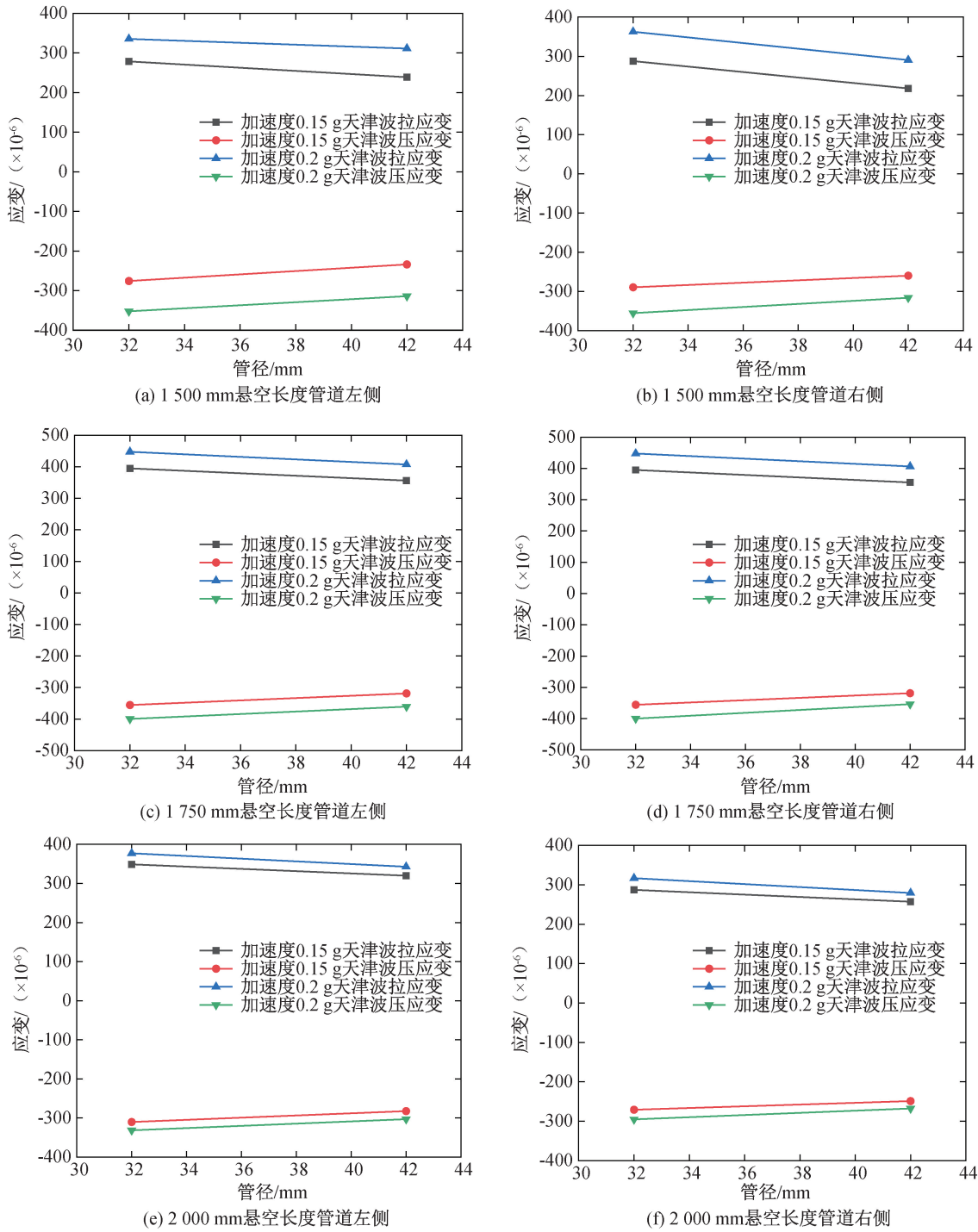


图 10 管径与管道应变关系

Fig. 10 Relationship between pipe diameter and pipeline strain

尽量选择大口径的管道,有利于降低地震荷载作用下悬空管道的影响。

参考文献:

[1] 祝恣智,段沛夏,王红菊,等. 全球油气管道建设现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2015, 34(12): 1262-1266.
 [2] 郭志阳,莫光贵,张天阳,等. 长距离地上输油管道保温

层厚度设计[J]. 长江大学学报:自然科学版, 2021, 18(4): 90-97.
 [3] 杜国锋,程晨,焦文帅,等. 基于压电陶瓷传感器的管道损伤识别[J]. 长江大学学报:自然科学版, 2021, 18(2): 109-117.
 [4] 张鹏,魏鞞,崔立伟,等. 地表冲沟条件下悬空管道的力学模型与延寿分析[J]. 天然气工业, 2014, 34(4): 142-148.

- [5] 赵潇, 马廷霞, 谢娜娜. 地震波动下悬空管道的动力响应分析[J]. 石油机械, 2014, 42(3): 110-114.
- [6] 罗金恒, 赵新伟, 王峰会, 等. 地质灾害下悬空管道的应力分析及计算[J]. 压力容器, 2006(6): 23-26.
- [7] HINDY A, NOVAK M. Earthquake Response of Underground Pipelines[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1979, 7(5): 451-476.
- [8] 王海波, 林皋. 半无限弹性介质中管线地震反应分析[J]. 土木工程学报, 1987(3): 80-91.
- [9] 武立伟. 埋地管道极限悬空长度研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2015.
- [10] 王小龙, 姚安林. 埋地钢管局部悬空的挠度和内力分析[J]. 工程力学, 2008(8): 218-222.
- [11] 杜景水, 马廷霞, 王维斌. 基于小挠度理论的悬空管道力学分析[J]. 油气储运, 2009, 28(1): 16-18+84.
- [12] 盖丽华. 大位移作用下埋地管道性能分析及隔震设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [13] 廖恒, 雷震, 徐晋东, 等. 山地悬空管道地震作用下的动态响应分析[J]. 长江大学学报: 自科版, 2018, 15(9): 51-56+6.
- [14] 雷震. 跨斜滑断层埋地管道力学性能研究[D]. 荆州: 长江大学, 2019.
- [15] 林皋, 朱彤, 林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J]. 大连理工大学学报, 2000(1): 1-8.
- [16] 吕西林, 陈跃庆. 结构-地基相互作用体系的动力相似关系研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(3): 85-92.
- [17] 张志超, 王进廷, 徐艳杰. 跨断层地下管线振动台模型试验研究(I)——试验方案设计[J]. 土木工程学报, 2011, 44(11): 93-98.
- [18] JIAO Wenshuai, XU Jindong, TIAN Jiangping, et al. Seismic Response Analysis of Buried Pipelines with the High Drop [J/OL]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, (2021-04-07) [2021-07-21] <http://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.101667>.
- [19] 焦文帅, 徐晋东, 肖伟, 等. 基于振动台模型试验的高落差埋地管道地震响应研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(1): 193-202.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第6页)

- [14] 李兵, 张齐, 孟爽. 圆钢管再生混凝土短柱轴压承载力有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2014, 30(6): 1037-1043.
- [15] 吴胜, 申兴月, 李迪, 等. 方钢管再生混凝土短柱轴压力学性能有限元分析[J]. 长江大学学报: 自科版, 2015, 12(28): 26-29+37+4.
- [16] 郝江华, 高欣乐, 李超. 钢管再生混凝土轴压短柱受力性能有限元分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(5): 145-148.
- [17] 王依群. 混凝土结构设计计算算例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

(责任编辑 周雪梅)