

地下管线三向地震动一致激励与非一致激励数值分析^①

刘飞成¹, 张建经¹, 邓小宁², 王志佳¹

(1.西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2.郑州中核岩土有限公司, 河南 郑州 450002)

摘要:基于某工业地下管道建立有限元模型, 考虑管土相互作用和行波效应, 综合分析在三向地震动一致激励与非一致激励下的管道动力响应结果, 并且简单分析部分相关因素对管道动力响应结果的影响。结论如下: 对于地下管道来说, 非一致激励与一致激励作用下的位移响应曲线在峰值和形状方面存在较为明显的不同, 具体表现为: 非一致作用水平向位移远大于一致作用, 而竖直向位移稍大于一致作用; 对于应力响应, 不管一致还是非一致激励, 同一截面各处的应力响应有明显不同, 并且总体来说非一致作用下较大; 位于管道走向变化段、土层变化处和管道弯曲段的截面的位移响应峰值和应力响应一般会产生突变, 说明这些因素对管道的动力响应具有较为明显的影响。

关键词: 地下管; 行波效应; 管土相互作用; 位移响应; 应力响应

中图分类号: TV672

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0355-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0355

Numerical Analysis of Underground Pipeline under Uniform and Non-uniform Excitations of Three-directional Ground Motion

LIU Fei-cheng¹, ZHANG Jian-jing¹, DENG Xiao-ning², WANG Zhi-jia¹

(1.College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2.Zhengzhou CNC Geotechnical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: Based on one industrial underground pipeline, with soil-pipe interaction and traveling wave effect taken into consideration, a finite element model was built to study the dynamic response of pipelines under uniform and non-uniform excitation, and the influence of some relative factors was analyzed. The results are: the peak value of the displacement response curve under non-uniform excitation, as well as shape, differs from that under uniform excitation. Horizontal displacement under non-uniform excitation is apparently greater than that under uniform excitation, while vertical displacement under non-uniform excitation is slightly greater than that under uniform excitation. The stress response of one monitor point differs from that of other points on the same section under both uniform and non-uniform excitation, and the stress response under non-uniform excitation is more intense compared to that under uniform excitation. Displacement and stress of a pipeline in the subsurface is usually influenced by the change in soil properties and pipe trend and bucking under seismic excitation.

Key words: underground pipeline; traveling wave effect; soil-pipe interaction; displacement response; stress response

0 引言

地下管线,尤其是长距离的地下管线,在当今的土木工程建设中极为普遍。如果地下管线遇到地震等自然灾害,很容易发生破坏,从而影响到其正常工作,最终会对人们的安全以及生活带来很大的影响。如 1995 年日本阪神大地震中神户地区供排水系统主管网破坏 1 610 处,导致 110 万用户断水,一周后仅修复三分之一,100 多天后才全部修复,与此同时,该地区供气系统、供电系统也都遭到严重破坏,还导致了次生灾害的发生^[1-2]。2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级大地震让映秀镇附近位于龙门山断裂带上的居民伤亡惨重,城镇基础设施及房屋遭到了严重破坏,供水、排水、电力、通讯系统全部中断。所以对于地下管道的抗震研究应该给予重视。

对于长距离地下管道,通常沿线的地质条件不同,且管道的走向也会有变化,因而地震波在管道各点引起的振动也存在一定的差异,这主要是由行波效应、部分相干效应、衰减效应和局部场地效应造成的,其中以行波效应为主^[3]。甘文水和侯忠良^[4]利用有限元建模分析了地震行波作用下埋设管线的反应。Toki 和 Takada^[5]通过实验和数值模拟分析了表面土层的刚度和厚度变化对地下管道的动力响应的影响。屈铁军^[6]和 Nakamura H 等^[7]研究考虑空间相关性对地下管道的动力响应。禹海涛等^[8]对非一致激励下长距离输水隧道地震响应展开了分析研究。若对长距离管道抗震研究不考虑地震动的空间变化采用一致地震动输入,会产生比较大的误差,所以对于地下管道的抗震分析,必须要考虑行波效应等因素,采用非一致地震动输入^[9-10]。

总体来说,前人对地下直管穿过均质土体的研究较多,较少涉及到有关地下弯管穿过非均质土体的研究。基于此,本文以某实地长距离非长直地下管道为例,建立包括地基土、管道在内的三维有限元模型,考虑管土相互接触以及材料阻尼,比较一致激励下与非一致激励下管道的响应结果,研究考虑行波效应对长距离管道的位移和应力响应的影响。

1 有限元建模

原场地所处地区表层覆有一定厚度的人工填土,以黏土、细砂岩和泥质粉砂岩为主。管道埋深较浅,并且考虑管道在原场地三维空间里的走向变化(图 1 中截面 4 即位于管道走向变化段)。模型划分网格后的视图如图 2 所示。对于边界问题,在初始静力计算时采用固定约束,在动力计算时采用黏弹

性边界,关于黏弹性边界具体在后文介绍。

本构模型基于 Mohr-Coulomb 准则,土体参数如表 1 所示。土体采用实体单元,管道采用有一定厚度的壳单元,定义为线弹性材料,其弹性模量为 205 GPa,泊松比 0.3,密度 2 500 kg/m³。在管道沿线布置监测面,同一监测面上布置四个监测点,分别位于顶部、腰部(左右)以及底部。监测界面位置及监测点布置如图 3 所示,其中截面 8、9 和截面 11 都位于土层变化处,即土体的性质发生改变处。

表 1 土体参数
Table 1 Soil parameters

土层名称	<i>E</i> /kPa	<i>ν</i>	<i>ρ</i> /(kg·m ⁻³)
填土	20 000	0.4	1.6
黏土	14 670	0.3	1.911
全风化细砂岩	20 400	0.22	2.18
中风化细砂岩	29 000	0.3	2.22
微风化细砂岩	36 600	0.22	2.43
微风化泥质粉砂岩	36 000	0.3	2.6
中风化泥质粉砂岩	32 300	0.3	2.55
全风化泥质粉砂岩	23 600	0.3	2.35

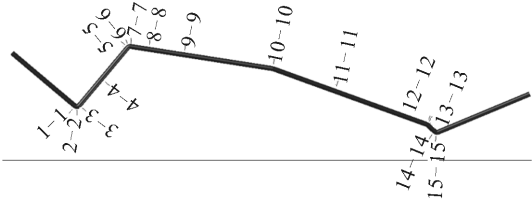


图 1 截面沿管道分布情况

Fig.1 Distribution of monitoring sections along the pipeline

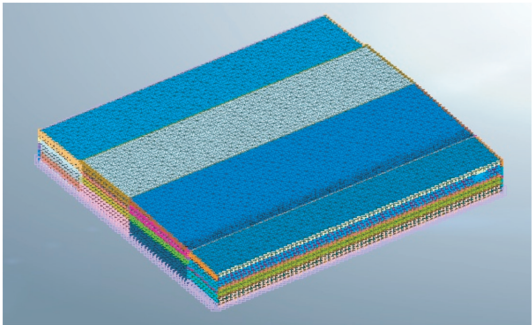


图 2 模型划分网格后的视图

Fig.2 Profile of model mesh

土体阻尼采用 Rayleigh 阻尼,黏性阻尼矩阵 $[C]$ 写成质量矩阵 $[M]$ 和刚度矩阵 $[K]$ 的线性组合形式:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \tag{1}$$

式中:

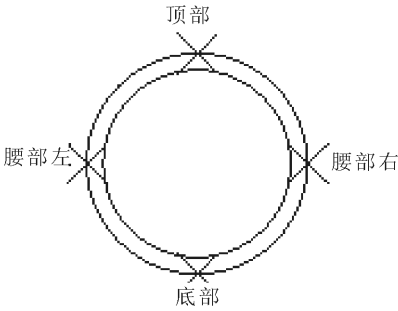


图 3 监测点布置

Fig.3 Distribution of observation points

$$\alpha = 2(\frac{\xi_1}{\omega_1} - \frac{\xi_m}{\omega_m}) / (\frac{1}{\omega_1^2} - \frac{1}{\omega_m^2})$$

$$\beta = 2(\xi_m \omega_m - \xi_1 \omega_1) / (\omega_m^2 - \omega_1^2)$$

其中, ξ_1 和 ξ_m 分别为第 1 和第 m 模态的阻尼比; ω_1 取第一模态的自振频率, ω_m 为第 m 模态的自振频率, 一般对于具有大量自由度的结构来说, 只有很少的几个模态对动力响应有明显影响, 一般情况下取 $m=3$ 就能满足计算精度的要求^[11]。

管道与土体接触单元参数的设置为此次关键的参数设置, 模拟中采用 Goodman 单元^[12], 假定接触面上的法向应力和剪应力与法向相对位移和切向相对位移之间无交叉影响, 其单元形式如图 4 所示。其应力与相对位移的关系式如式 2 所表示。

$$\{\sigma\} = [k_0] \{\omega\} \tag{2}$$

式中: $[k_0] = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix}$, $\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma_n \end{Bmatrix}$, $\{\omega\} = \begin{Bmatrix} \omega_s \\ \omega_n \end{Bmatrix}$ 。

k_s, k_n 分别为切向和法向刚度系数。

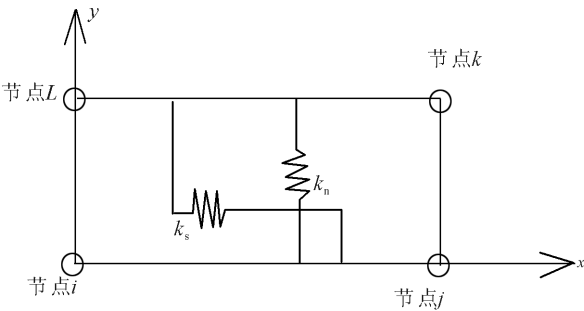


图 4 Goodman 单元模型

Fig.4 Goodman element model

Goodman 单元在有限元软件模拟接触时运用的相当广泛, 能较好地反应接触面切向应力和变形的发展, 并考虑接触面变形的非线性特性, 其精度与实用性也得到了验证^[13]。

模型的动力边界采用黏弹性边界, 通过沿人工边界设置一系列由线性弹簧和阻尼器组成的物理元

件来吸收射向人工边界的波动能量和反射波的散射, 通过黏性阻尼的吸能作用和弹簧的刚性恢复作用模拟无限远对广义结构的影响, 从而可以较好地模拟地震波通过人工边界的透射过程^[14]。

2 结果分析

本次计算采用 Chichi 地震波, 原场地的抗震设防烈度为Ⅷ度, 故输入地震波的加速度峰值为 0.21 g, 三个方向的加速度时程如图 5 所示。值得说明的是, x 和 y 向是平面上两个相互垂直的方向, z 向是竖直方向, 其中 x 方向与图 1 中截面 1 所在直线段平行。

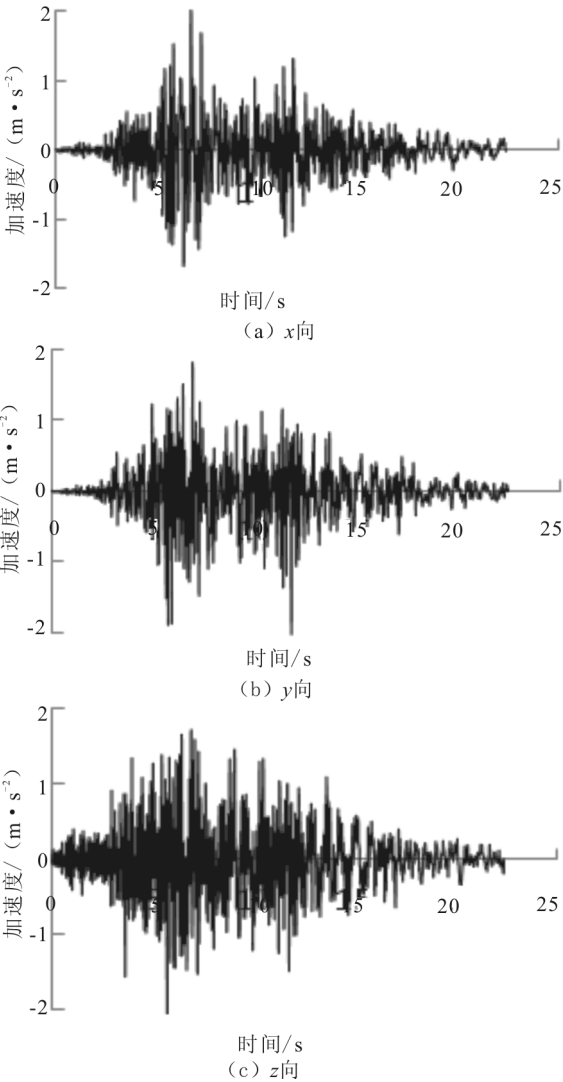


图 5 三方向加速度时程曲线

Fig.5 Acceleration time-history curves in three directions

本文的非一致输入主要通过行波输入来实现, 即模型底部不同位置点受到的地震激励是不同步的, 沿着地震波传播的方向从基底的一点传到下一

点所需要的具体时间为

$$\Delta t=L/C \tag{3}$$

式中： L 为沿地震波传播方向相邻两点的距离； C 为地震波在模型底部土体的传播速度。

限于篇幅,仅把具有代表性的截面动力响应结果列出进行分析。在比较非一致与一致激励作用下管道位移的响应,选择截面 10 上的各监测点进行分析。图 6 和图 7 分别表示截面 10 顶部监测点在一致和非一致作用下的位移响应曲线,两种激励作用下的位移峰值列在表 2 中。

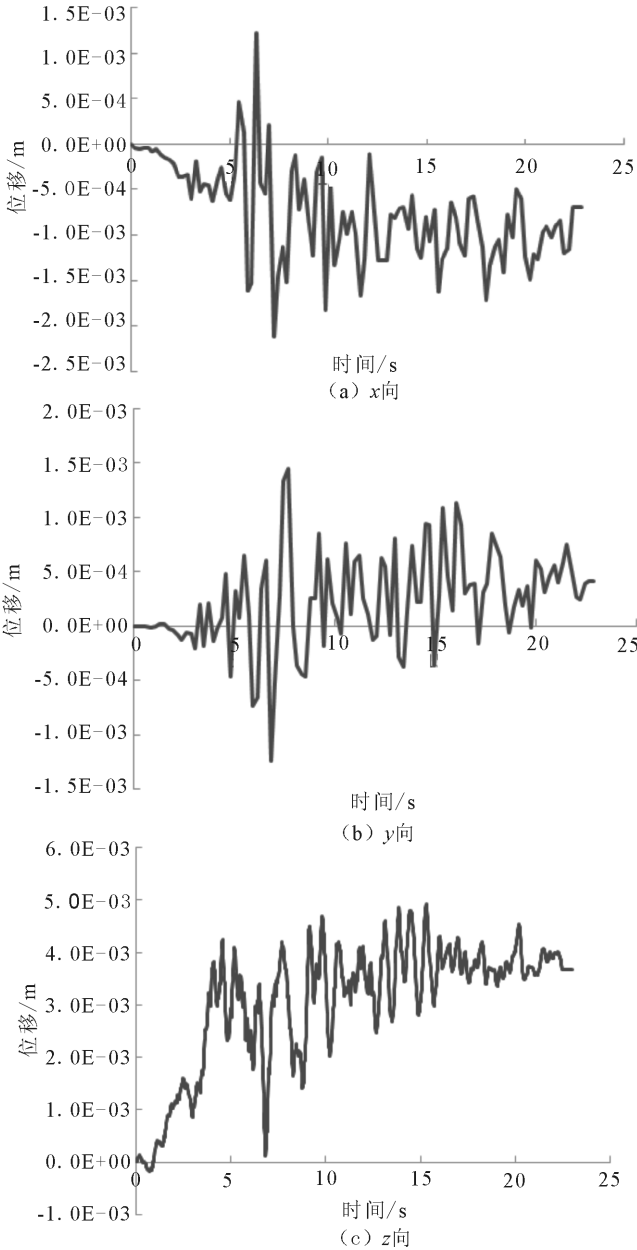


图 6 截面 10 顶部三方向位移响应曲线(一致)
Fig.6 Displacement response curves in three directions on top of section 10 (uniform)

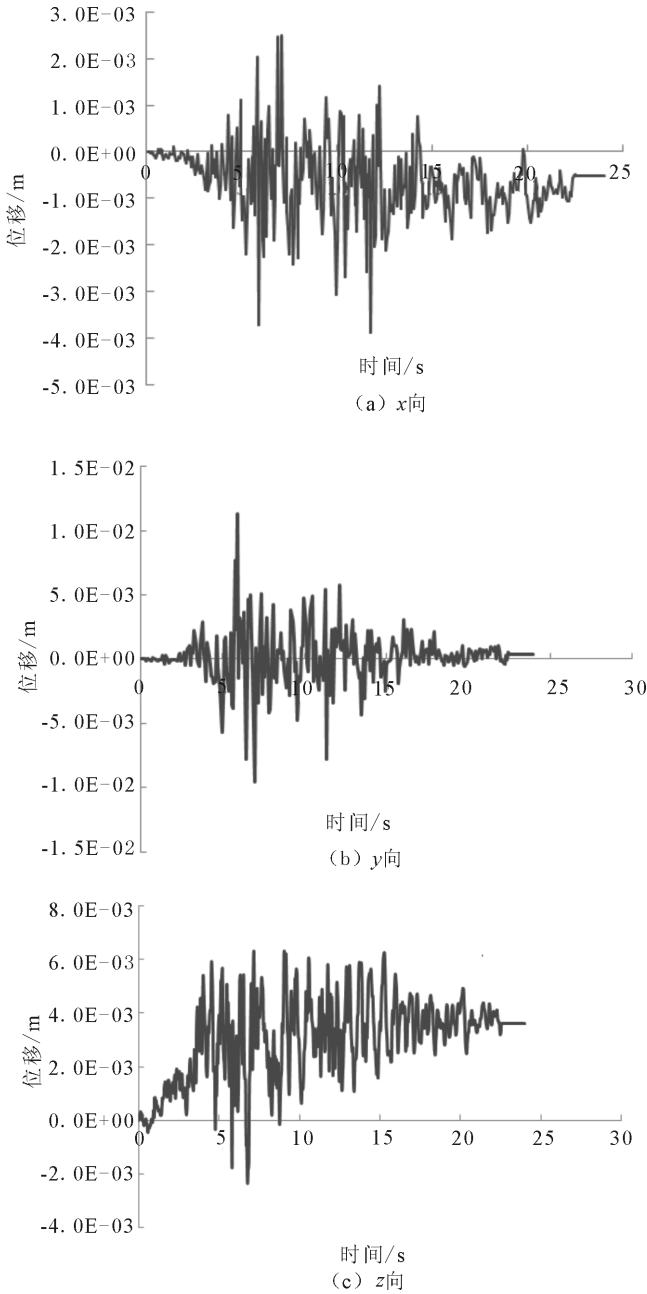


图 7 截面 10 顶部三方向位移响应曲线(非一致)
Fig.7 Displacement response curves in three direction on top of section 10 (non-uniform)

由以上的位移结果可以看出,尽管输入相同的地震波,但是由于地震动输入模式的不同,导致管道同一位置处的位移响应曲线在形状和幅值方面有明显不同,但是两种激励作用下管道同一部位的位移曲线变化最终逐渐趋于一致。总体来说,无论水平向位移还是竖向位移,非一致作用下的位移幅值均大于一致作用下的位移幅值,且各方向的位移峰值增大倍数不一致,其中 x 向增大倍数大约为 4.5 左右, y 向约为 6.0 左右, z 向约 1.4 左右。可以看出

非一致作用对水平向位移影响较大,相比来说,竖向的位移受非一致的影响较小。

对于很多结构物诸如房屋、桥梁、隧道以及地下管道,残余位移会导致严重破坏^[15]。表 3 列出了截面 10 上各监测点在一致和非一致激励作用下的残余位移。可以看出,对于水平向的残余位移值,一致作用稍大于非一致作用;对于竖直向残余位移值,一致作用几乎等于非一致作用。总体来说,水平向的残余位移值大于竖向位移值。

图 8 给出了非一致作用下管道沿线各断面三个

方向位移峰值的变化情况。可以看出,水平向位移峰值沿管线走向变化较大,其中 x 向位移峰值在截面 4 陡然下降,减小约 20%,而 y 向位移峰值则增大约 13%。并且对比截面 8 和 9 可以发现,两截面的 x 和 y 向位移峰值的变化都较为明显,分别相差约 32%和 24%,而管道弯曲段的位移峰值几乎没有突变。表明非一致作用下相比管道沿线长直段的截面,管道走向变化段和土层变化处的截面的水平向位移峰值变化明显。

表 2 截面 10 上的各监测点的位移峰值
Table 2 Peak displacement of each observation point on section 10

监测点	x 向			y 向			z 向		
	一致/m	非一致/m	增大倍数	一致/m	非一致/m	增大倍数	一致/m	非一致/m	增大倍数
顶部	0.001 3	0.005 6	4.35	0.001 7	0.010 3	6.03	0.004 9	0.006 8	1.38
腰部右	0.001 3	0.005 8	4.51	0.001 7	0.010 2	5.97	0.004 9	0.006 8	1.38
底部	0.001 2	0.005 4	4.32	0.001 7	0.009 9	5.89	0.004 9	0.006 8	1.38
腰部左	0.001 2	0.005 6	4.50	0.001 7	0.010 1	5.94	0.004 9	0.006 8	1.38

表 3 截面 10 上的各监测点的残余位移
Table 3 Residual displacements of each observation point on section 10

残余位移	一致/m			非一致/m		
	x	y	z	x	y	z
顶部	−0.000 695	0.000 411	0.003 665	−0.000 519	0.000 360	0.003 607
腰部右	−0.000 680	0.000 402	0.003 654	−0.000 518	0.000 354	0.003 605
底部	−0.000 669	0.000 404	0.003 662	−0.000 520	0.000 358	0.003 604
腰部左	−0.000 683	0.000 413	0.003 673	−0.000 520	0.000 364	0.003 607

图 9 给出了一致作用下管道沿线各断面的三个方向位移峰值的变化情况。可以看出,水平向位移峰值变化沿管线走向变化较小,截面 4 顶部的 x 和 z 向位移峰值明显陡增,分别增大约 78%和 105%,即说明管道走向变化段上的位移峰值会有较大的突变,原因可能是管道走向改变,相当于地震波入射角发生变化^[15]。其结果表明,一致作用下管道弯曲段和土层变化处的截面位移峰值几乎没有突变。

由以上分析可以看出,位移峰值突变在非一致作用下一般发生在管道走向变化段和土体变化处;而一致作用下则一般发生在管道走向变化段。

一致和非一致激励作用下管道各监测截面的正应力峰值和剪应力峰值见表 4。相比于一致激励作用,非一致作用下管道应力响应会显著增大。对比截面 1 和 2、截面 12 和 13 以及截面 14、15 的应力增大倍数可以发现,相比管道直线段截面,管道弯曲段截面应力增大倍数明显变大,即非一致作用对管道弯曲处应力响应的影响要大于对直线段的影响。综合分析截面 8、9 和 11 的应力增大倍数,可以发现土

层变化对应力增大倍数影响较小。位于管道走向变化段截面 4 的剪应力增大倍数明显偏大,即截面 4 处主要发生扭转变形。

表 4 一致与非一致激励作用下管道沿线各断面应力峰值
Table 4 Peak stress of each section along the pipeline under uniform and non-uniform excitation

截面	正应力			剪应力		
	一致 /kPa	非一致 /kPa	增大 倍数	一致 /kPa	非一致 /kPa	增大 倍数
1	2.54	29.07	11.46	1.56	7.68	4.94
2	1.60	58.41	36.53	2.60	43.47	16.72
3	2.52	37.23	14.76	0.93	29.57	31.82
4	5.22	63.71	12.20	0.43	45.56	104.86
5	5.32	43.00	8.09	2.06	18.44	8.95
6	4.04	54.80	13.56	3.13	12.23	3.91
7	2.91	103.87	35.73	1.36	22.79	16.74
8	4.46	25.99	5.83	3.48	14.17	4.07
9	3.06	74.77	24.43	1.92	16.13	8.42
10	2.73	67.13	24.61	2.10	37.29	17.80
11	4.69	45.49	9.69	2.63	28.80	10.94
12	4.77	36.07	7.56	1.62	7.22	4.46
13	3.28	41.56	12.69	1.86	24.71	13.31
14	3.54	45.94	12.98	1.99	6.14	3.08
15	3.68	97.03	26.36	1.21	25.10	20.69

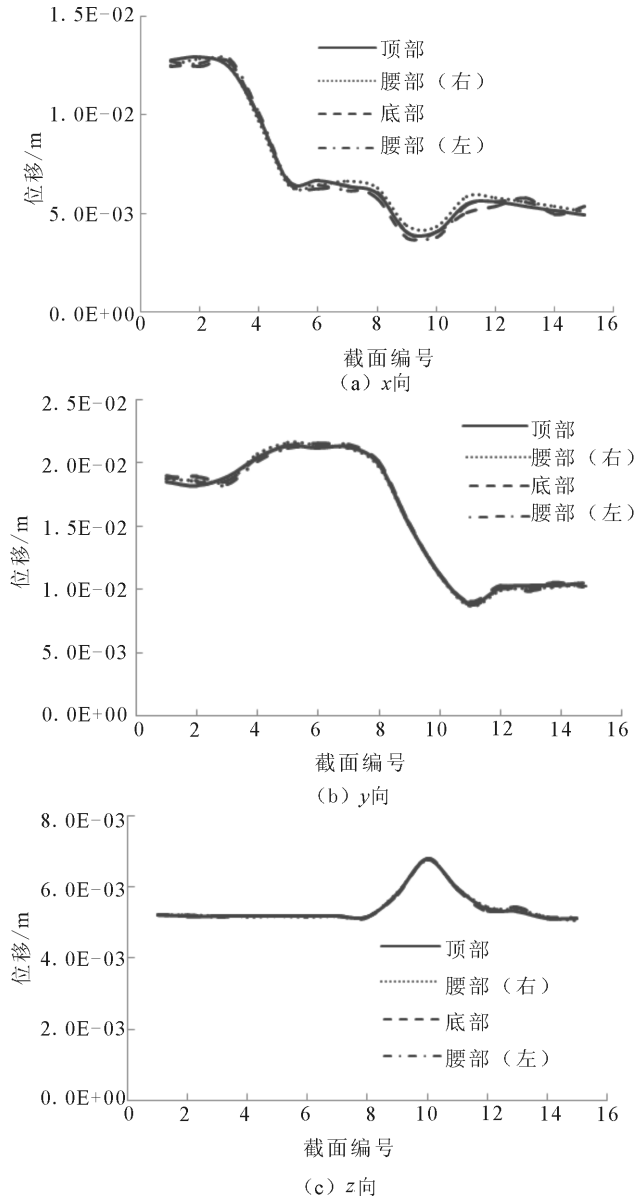


图 8 管道沿线各断面三方向位移峰值(非一致)

Fig.8 Peak displacemtn in three directions of each section along the pipeline (non-uniform)

3 结论与建议

本文基于某实地长距离地下管道的工程应用实例,建立包括土体、地下管道在内的三维有限元模型,分析非一致和一致地震动作用下地下管道的地震响应问题,初步结论与建议如下:

(1) 相比于一致激励作用,非一致激励作用下的位移响应曲线在形状和峰值上都有明显不同,其中非一致作用下的水平向位移峰值要明显大于一致作用,竖向位移峰值稍大于一致作用,即非一致作用下和一致作用下的竖向位移的差别很小。管道同一部位两种激励作用下的位移曲线变化最终逐渐趋于

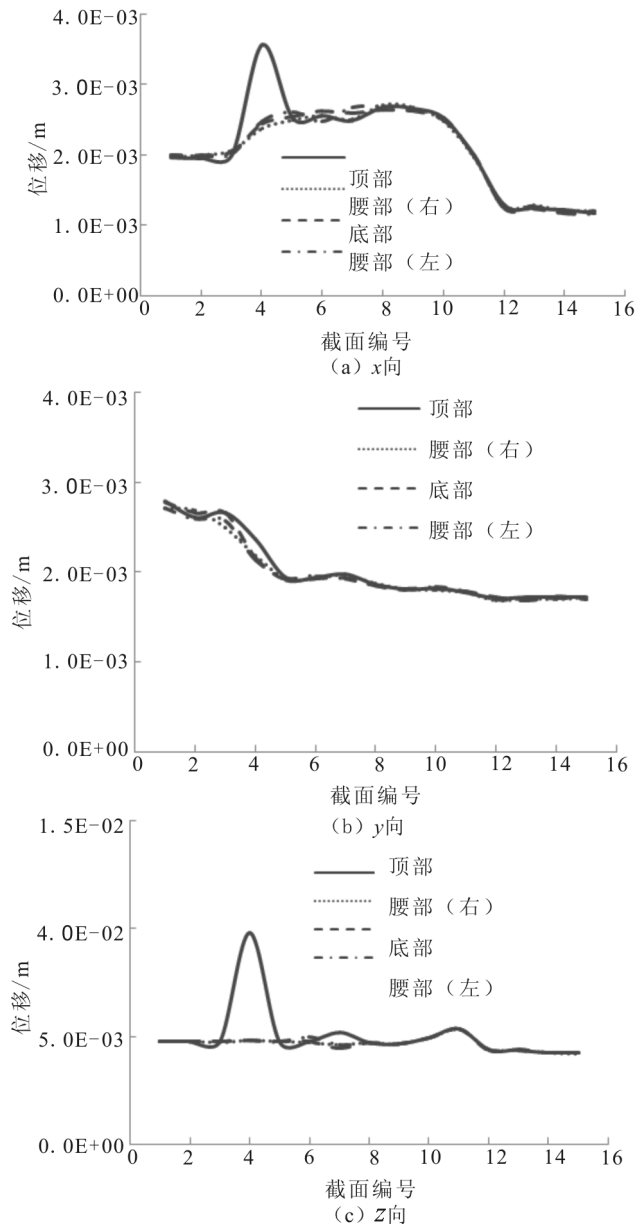


图 9 管道沿线各断面三方向位移峰值(一致)

Fig.9 Peak displacement in three directions of each section along the pipeline (uniform)

一致。

(2) 非一致激励作用下位移峰值突变一般发生在管道走向变化段和土层变化处,一致作用下则一般发生在管道走向变化段。

(3) 水平向的残余位移值大于竖向残余位移值。对于水平向的残余位移值,一致作用稍大于非一致作用,对于竖直向残余位移值,一致作用几乎等于非一致作用。

(4) 相比一致作用,非一致激励作用会显著增大管道应力响应,且同一截面不同部位的应力响应也与一致激励作用下的不同,并且非一致激励对管

道弯曲段的影响要大于对直线段的影响。管道走向变化段受非一致激励影响也较大。

(5) 在长距离地下管道的抗震分析中建议采用非一致激励作用,并应该综合考虑其他一些影响因素,从而才能确定比较合理的地下管道的布置方式。

参考文献(References)

- [1] Hisashi, Sumitomo, et al. System Analysis of Earthquake Damage on Water Supply Networks in Kobe City[C]//Proceedings of the 4 International Symposium on Water Pipe Systems, 1997.
- [2] 孙绍平.阪神地震中给水管道路震害及其分析[J].特种结构, 1997, 14(2): 51-55.
SUN Shao-ping. Analysis of Seismic Damage to Water Supply Pipeline During the 1995 Great Hanshin Earthquake[J]. Special Structures, 1997, 14(2): 51-55. (in Chinese)
- [3] 何庆祥, 沈祖炎. 结构地震行波效应分析综述[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(1): 50-57.
HE Qing-xiang, SHEN Zu-yan. Review of Structural Seismic Analysis of Travelling Wave Effects[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(1): 50-57. (in Chinese)
- [4] 甘文水, 侯忠良. 地震行波作用下埋设管线的反应计算[J]. 地震工程与工程振动, 1988, 8(2): 79-86.
GAN Wei-shui, HOU Zhong-liang. Response Calculation of Buried Pipeline under Seismic Wave [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1988, 8(2): 79-86. (in Chinese)
- [5] Toki K, Takada S. Seismic Response of Linear Structures Buried in Ground with Discontinuous Properties[C]//Proceedings of 13th JSCE Symposium on Earthquake Engineering, 1974.
- [6] Qu T. Research of the Space Variation Features of Ground Motion and Analysis of Seismic Response of the Underground Pipelines[D]. Beijing: Engineering Mechanics Research Institute of State Seismology Bureau, 1995.
- [7] Nakamura H, Yamazaki F. Spatial Variation of Earthquake Ground Motion Based on Dense Array Records[C]//Proceeding of the 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Editora de Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, 1995.
- [8] 禹海涛, 袁勇, 顾玉亮, 等. 非一致激励下长距离输水隧道地震响应分析[J]. 水利学报, 2013, 44(6): 718-725.
YU Hai-tao, YUAN Yong, GU Yu-liang, et al. Effect of Non-uniform Excitation on Seismic Response of Long-distance Water-conveyance Tunnel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(6): 718-725. (in Chinese)
- [9] 李杰. 生命线工程抗震[M]. 第一版. 北京: 科学出版社, 2005.
LI Jie. Lifeline Earthquake Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [10] 禹海涛. 软土盾构隧道多尺度仿真方法及大规模地震响应分析[D]. 上海: 同济大学, 2011.
YU Hai-tao. Research on Multiscale Simulation Method and Large Scale Seismic Responses of Shield Tunnel in Soft Soil [D]. Shanghai: Tongji University, 2011. (in Chinese)
- [11] Indrajit Chowdhury, Shambhu P. Dasgupta. Computation of Rayleigh Damping Coefficients for Large Systems [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2003, (8), Bundle C.
- [12] R E Goodman, R L Taylor, T L Berkke. A Model for the Mechanics of Jointed Rocks[J]. ASCE, 1968, 94(3): 637-659.
- [13] 艾晓秋, 李杰. 地下管线的有效应力地震反应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(1): 1-7.
AI Xiao-qiu, LI Jie. Analysis of Seismic Response of Underground Pipelines in Terms of Effective Stress[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25(1): 1-7. (in Chinese)
- [14] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1070-1075.
LIU Jing-bo, GU Yin, DU Yi-xin. Consistent Viscous-spring Artificial Boundaries and Viscous-spring Boundary Elements [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1070-1075. (in Chinese)
- [15] Yun Wook Choo, Tarek H Abdoum, Michael J O'Rourke, et al. Remediation for Buried pipeline Systems Under Permanent Ground Deformation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27: 1043-1055.
- [16] 曹国东. 埋地钢制管道的地震响应分析[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.
CAO Guo-dong. Earthquake Response Analysis on Buried steel Pipeline [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011. (in Chinese)