

薛景宏,王鑫.地震动多点差异输入对架空管道地震响应影响研究[J].地震工程学报,2019,41(6):1426-1431.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1426
XUE Jinghong, WANG Xin. Effect of Multi-support Differential Ground Motion Input on Seismic Response of Overhead Pipelines[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1426-1431. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1426

地震动多点差异输入对架空管道地震响应影响研究

薛景宏^{1,2}, 王鑫^{1,3}

- (1. 东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318;
2. 黑龙江省防灾减灾及防护工程重点实验室, 黑龙江 大庆 163318;
3. 大庆油田有限责任公司第三采油厂, 黑龙江 大庆 163000)

摘要: 架空管道由于地震波传递、地震动衰减以及场地不均匀产生各支撑点地震动差异,为了研究这种差异对架空管道地震响应的影响,通过有限元软件 ADINA 建立架空管道有限元模型,利用 MATLAB 软件编写具有相干效应的人工地震波,计算分析了多点地震动相干函数法输入、行波输入与一致输入下地震响应。结果表明:①随着视波速的增加管道轴向应变变小,有接近一致激励情况的趋势;②同一相干函数模型,考虑和忽略场地效应,管道轴向应变最大值存在差异;不同相干函数模型,管道轴向应变最大值也存在差异。结论认为,如果场地比较均匀且管段较短,可采用行波法进行地震输入;长柔管道应采用相干法进行地震响应分析,场地不均匀的长柔管道,应同时考虑场地效应。

关键词: 架空管道; 相干效应; 多点差异输入; 地震响应

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)06-1426-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1426

Effect of Multi-support Differential Ground Motion Input on Seismic Response of Overhead Pipelines

XUE Jinghong^{1,2}, WANG Xin^{1,3}

- (1. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China;
2. Heilongjiang Key Laboratory of Disaster Prevention, Mitigation and Protection Engineering, Daqing 163318, Heilongjiang, China;
3. Third Oil Production Plant, Daqing Oil Field Co., Ltd., Daqing 163000, Heilongjiang, China)

Abstract: Overhead pipeline is a typical, long-flexible structure. Ground motions of different support are distinct due to the seismic wave propagation, seismic wave attenuation, and soil nonuniformity. To analyze the effect of differential inputs on the seismic response of overhead pipelines, seismic responses under coherence function input, traveling wave input, and uniform input were simulated and compared. An overhead pipeline model was established using the finite element software Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis (ADINA), and artificial seismic waves with coherence effects were compiled by MATLAB. Results showed that: (1) As the apparent wave velocity increased, the axial strain of the pipe decreased, which was close to the case of a consistent excita-

收稿日期: 2019-08-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51178087);黑龙江省教育厅科研专项(2016YSFX-02);中国石油科技风险创新基金(07-06D-01-04-05-03)

第一作者简介: 薛景宏(1968—),男,教授,博士,主要研究方向为防灾减灾工程及防护工程。E-mail: xjh0459@126.com。

tion; (2) maximum axial strain of pipelines having the same coherence function model was different with and without the consideration of site effect; and (3) for different coherence function models, the maximum axial strain of the pipeline was also distinct. It is concluded that if the site is uniform and the pipeline is short, the traveling wave method can be used for seismic input, the coherence method should be used for seismic response analysis of long flexible pipelines, and the site effect should be considered simultaneously for long flexible pipelines over an uneven site.

Keywords: overhead pipeline; coherence effect; multi-support differential input; seismic response

0 引言

管线作为生命线工程,其抗震性能已经被广为研究^[1-2]。一般情况下,建筑结构在地震作用下的响应分析通常假定地震动输入是一致的^[3],地震动仅体现为随时间的变化特性而不考虑不同支撑处的地震动空间变化,这在跨度不大的建筑结构地震响应分析中是合理可行的,然而对于管道这种大跨度的结构,一致地震动输入显然是不符合实际情况的,很可能会导致不合理的抗震设计^[4-5]。

随着地震记录和震害经验的积累,人们认识到地震时地面各点的地震动由于以下几个因素而具有空间差异性:相干效应、场地效应、行波效应和波的衰减效应^[6-8]。主要考虑相干效应、场地效应、行波效应,在管道地震响应分析中采用多点差异输入模式,考虑地震动的空间变化特性对管道地震响应的影响,具有理论与实践意义^[9-10]。

1 有限元模型建立

架空管道模型地上部分由三部分组成:管道、管卡和支撑结构(图 1)。研究对象为 152 m 长架空管道,管道每隔 6 m 设置支撑,支撑与管道通过管卡连接。管道半径 0.254 m,壁厚 0.016 m,管卡为钢圆环,与管道固接,长度 0.4 m,厚度 0.03 m。管道采用四节点壳单元模拟,沿管道轴线方向每隔 0.2 m 划分一个单元,沿管道圆周方向划分 16 个单元,管卡单元类型及圆周方向划分与管道相同,长度方向划分 2 个单元;支撑采用弹簧单元模拟,水平和竖向刚度设为无穷大。管道和管卡材料采用进口钢材 API5LX60,材料本构关系采用输油(汽)钢质管道抗震设计规范的三折线简化模型,如图 2 所示。

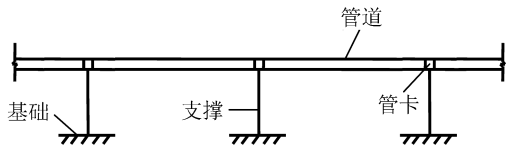


图 1 架空管道示意图

Fig.1 Schematic representation of the overhead pipeline

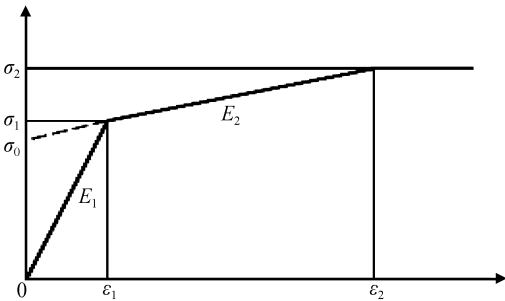


图 2 X60 管线钢应力-应变关系简化折线示意图

Fig.2 Stress-strain relation of pipeline steel X60

其中, $\sigma_0=462\text{ MPa}$, $\sigma_1=465\text{ MPa}$, $\epsilon_1=0.002\text{ 4}$, $E_1=2.1\text{e}5\text{ MPa}$, $\sigma_2=516\text{ MPa}$, $\epsilon_2=0.04$, $E_2=1\text{ 356 MPa}$;架空管道有限元模型及其横截面见图 3 和图 4,管道两端节点水平平动自由度释放,同时为了尽量避免采用单根支撑带来的模拟应力集中问题,管道支撑采用 3 根。

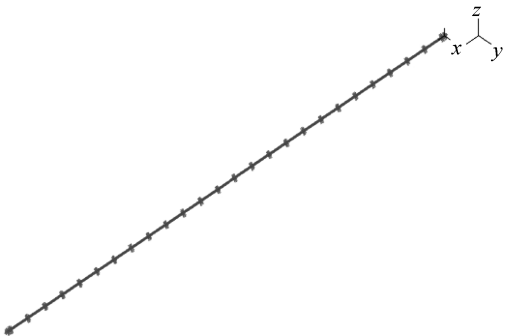


图 3 架空管道有限元模型

Fig.3 Finite element model of the overhead pipeline

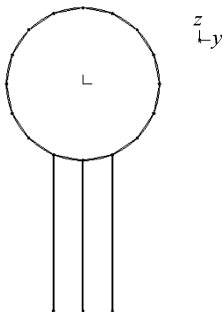


图 4 架空管道模型横截面

Fig.4 Model cross section of overhead pipe

2 数值模拟

2.1 地震动相干效应影响

2.1.1 地震波合成

(1) 自功率谱模型

功率谱模型采用杜修力-陈厚群功率谱模型^[11]：

$$S(\omega) = \frac{1}{1 + (D\omega)^2} \cdot \frac{\omega^4}{(\omega_0^2 + \omega^2)^2} \cdot \frac{1 + 4\xi_g^2 (\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\xi_g^2 (\omega/\omega_g)^2} S_0 \quad (1)$$

式中： D 为反映基岩特性的谱参数(s)； ω_0 为低频拐角频率； ξ_g 为场地阻尼比； ω_g 为场地卓越频率； S_0 为谱强度因子($\text{m}^2/(\text{rad} \cdot \text{s}^3)$)。场地类别为三类场地，抗震设防烈度为Ⅷ度，参考文献[12,13]，取 $D = 0.03 \text{ s}$ ， $\omega_0 = 1.83$ ， $\omega_g = 13.96$ ， $\xi_g = 0.8$ ， $S_0 = 0.003\ 345\ 713(\text{m}^2/\text{rad} \cdot \text{s}^3)$ 。根据屈铁军等^[14]的研究成果， S_0 取为常数是不合理的，假定地震波沿管道轴向传播，测点间土层厚度差为0，则有 $\Delta S_0 = -0.01\ 24d$ 成立， d 为两测点间的距离，考虑场址内 S_0 随 d 的变化时，则考虑了局部场地效应。

(2) 相干函数模型

① HV 模型

$$\gamma_{k,l}(\omega, d) = A \exp\left[-\frac{2d}{\alpha\varphi(\omega)}(1 - A + \alpha A)\right] + (1 - A) \exp\left[-\frac{2d}{\varphi(\omega)}(1 - A + \alpha A)\right] \quad (2)$$
$$\varphi(\omega) = K[1 + (\omega/k_0)^b]^{-0.5}$$

式中： A 、 α 、 K 、 k_0 、 b 为回归系数； d 为两测点间距离。参考文献[15]取 $A = 0.736$ ， $\alpha = 0.147$ ， $K = 5\ 210$ ， $k_0 = 6.85 \text{ rad/s}$ ， $b = 2.78$ 。

② QWW 模型

$$\gamma_{kl}(\omega, d) = \exp[-a(\omega)d^{b(\omega)}] \quad (3)$$
$$a(\omega) = a_1\omega^2 + a_2, b(\omega) = b_1\omega^2 + b_2$$

式中： a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 为回归系数，参考文献[14]取 $a_1 = 1.678 \times 10^{-5}$ ， $a_2 = 1.219 \times 10^{-3}$ ， $b_1 = -0.005\ 5$ ， $b_2 = 0.767\ 4$ 。

(3) 视波速

$$v_a(\omega) = c_1 + c_2 \ln\left(\frac{\omega}{2\pi}\right) \quad (4)$$

参数 c_1 和 c_2 参考文献[14]取 $c_1 = 3\ 344$ ， $c_2 = 1\ 095$ 。

(4) 时间包络函数

采用公式(5)时间包络函数^[16]来描述地震动随时间的非平稳性。

$$f(t) = \begin{cases} t^2/t_a^2 & t \leq t_a \\ 1 & t_a \leq t \leq t_b \\ \exp\{-c(t - t_b)\} & t \geq t_b \end{cases} \quad (5)$$

式中： t_a 、 t_b 和 c 为控制主震平稳段首末时间和衰减快慢的参数。主震段持续时间 $T = t_b - t_a$ ，参考文献[17]取 $t_a = 1.2 \text{ s}$ ， $t_b = 10.2 \text{ s}$ ， $c = 0.25$ 。

由自功率谱模型、相干函数模型和视波速即可生成互功率谱矩阵，本文利用 Hao^[18]的方法合成架空管道各支撑点处多点地震动。

2.1.2 数值模拟

考虑4种情况：HV模型忽略场地效应、HV模型考虑场地效应、QWW模型忽略场地效应、QWW模型考虑场地效应。采用大质量法对管道施加 y 向地震激励，4种工况管道最大轴向应变位置处轴向应变云图见图5~图8。

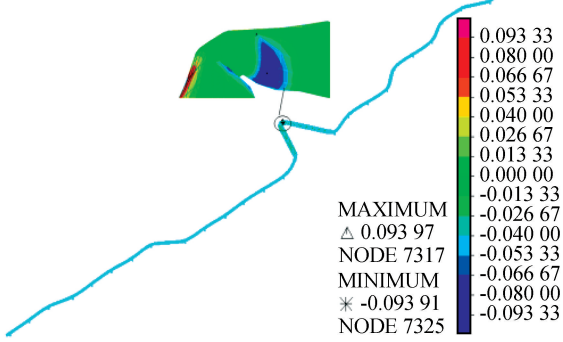


图5 HV模型：忽略场地效应
Fig.5 HV model:neglecting the site effect

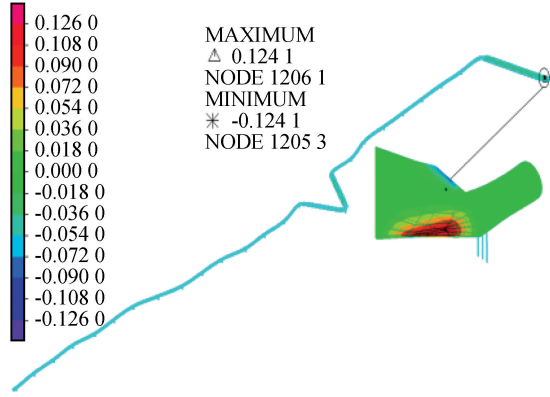


图6 HV模型 考虑场地效应
Fig.6 HV model:considering the site effect

分析得出，不同相干函数模型激励，管道地震响应有差异；同一相干函数模型激励，忽略和考虑场地效应两种情况，管道地震响应也有差异。对架空管道进行地震响应分析，应考虑场地效应的影响，要选取与场址相接近的相干函数模型来模拟多点地震动。

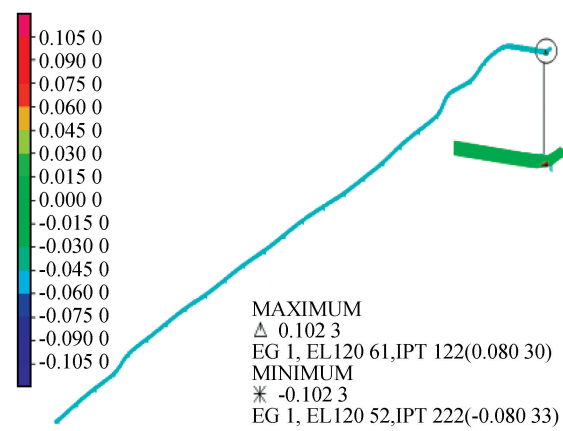


图 7 QWW 模型:忽略场地效应
Fig.7 QWW model:neglecting the site effect

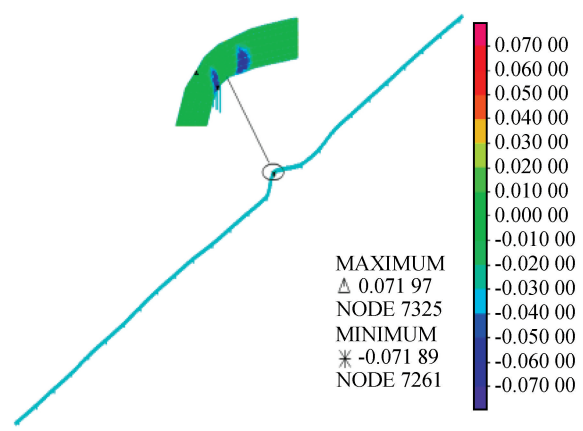


图 8 QWW 模型:考虑场地效应
Fig.8 QWW model:considering the site effect

表 1 管道轴向最大应变点应变及坐标

Table 1 Strain and coordinate of maximum axial strain point of pipeline				
工况	最大拉应变	最大拉应变点坐标	最大压应变	最大压应变点坐标
HV 模型:忽略场地效应	0.093 97	(60.6,-0.254,0)	-0.093 91	(60.6,0.254,0)
HV 模型:考虑场地效应	0.124 12	(1.4,0.254,0)	-0.124 11	(1.4,-0.254,0)
QWW 模型:忽略场地效应	0.102 30	(1.4,0.235,-0.097)	-0.102 30	(1.4,-0.235,-0.097)
QWW 模型:考虑场地效应	0.071 91	(61.4,-0.254,0)	-0.071 89	(61.4,0.254,0)

2.2 行波效应影响

采用大质量法对管道施加 El-Centro 加速度波、Taft 加速度波和天津加速度波,视波速考虑 500 m/s 和 1 000 m/s,进行一致激励和行波效应激励的比较。行波时管道最大轴向应变位置处轴向应变云图见图 9~图 14。

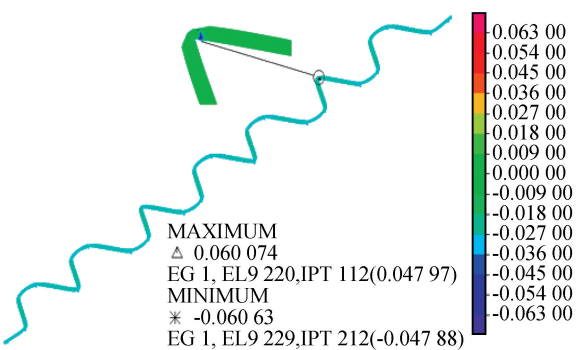


图 9 El-Centro 波:500 m/s
Fig.9 El-Centro wave:500m/s

分析得出,随着视波速的增加,管道轴向应变最大值有所减小,且考虑行波效应的管道地震响应比一致激励下管道地震响应要大,一般情况下对架空管道进行抗震分析,输入一致激励是偏于不安全的。

3 结论

分别考虑了相干函数法、行波法及一致输入法,进行了多支撑的架空管道地震响应输入问题研究,

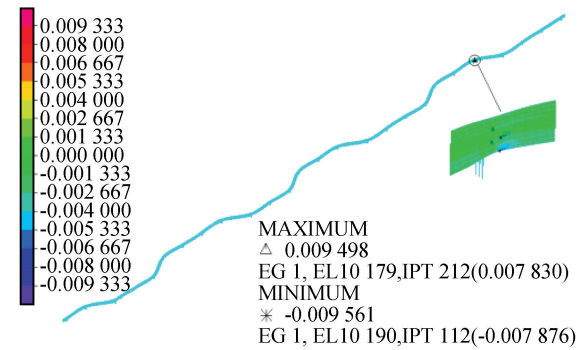


图 10 El-Centro 波:1 000 m/s
Fig.10 El-Centro wave:1 000 m/s

得到以下结论:

(1) 对比分析架空管道行波激励和一致激励下轴向应变,随着视波速的增加管道内力变小,有接近一致激励情况的趋势。如果场地比较均匀、地震波传递衰减很少且管段较短,又要考虑地震动差异性,可以采用行波法进行地震输入。

(2) 长柔管道、场地不均匀及地震波衰减较明显情况下,宜采用相干法进行管道地震响应分析。同一相干函数模型,考虑和忽略场地效应,管道轴向应变最大值存在差异,故对架空管道进行地震响应分析,应考虑局部场地效应。不同相干函数模型,管道轴向应变最大值存在差异,故实际计算中要选取与场址相接近的相干函数模型来模拟多点地震动。

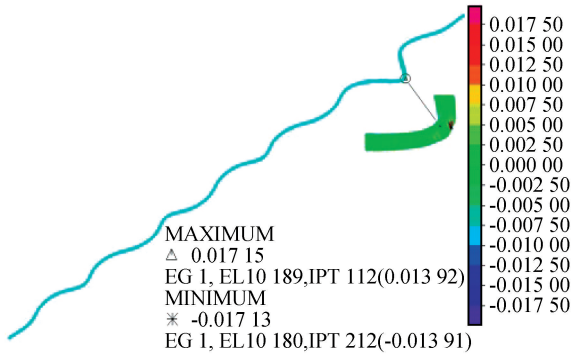


图 11 Taft 波:500 m/s
Fig.11 Taft wave:500 m/s

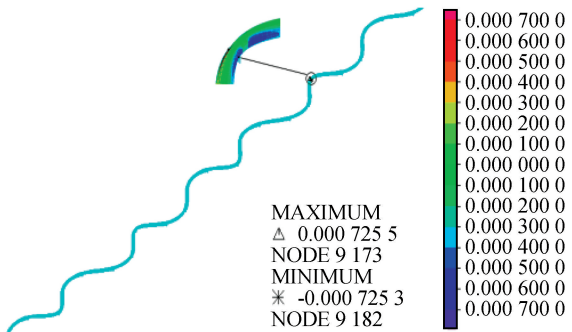


图 13 天津波:500 m/s
Fig.13 Tianjin wave:500 m/s

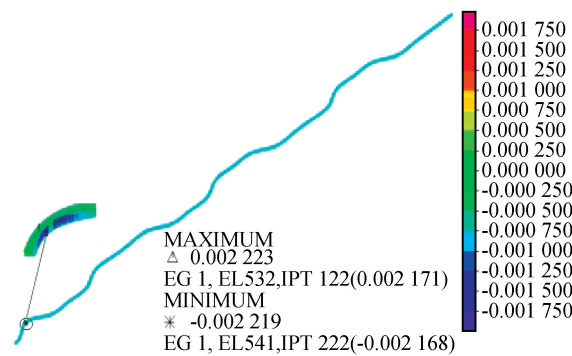


图 12 Taft 波:1 000 m/s
Fig.12 Taft wave:1 000 m/s

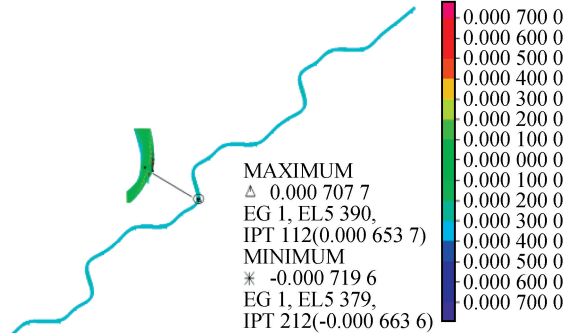


图 14 天津波:1 000 m/s
Fig.14 Tianjin wave:1 000 m/s

表 2 管道轴向最大应变点应变值(EI-Centro 波)

Table 2 The strain value of the maximum axial strain point of the pipe (EI-Centro wave)				
工况	最大拉应变	最大拉应变点坐标	最大压应变	最大压应变点坐标
波速 500 m/s	0.060 74	(36.6, -0.254, 0)	-0.060 63	(36.6, 0.254, 0)
波速 1 000m/s	0.009 50	(24.6, -0.235, -0.097)	-0.009 56	(24.6, 0.235, -0.097)
一致激励	0.000 61	(0, 0, 0.254)	-0.000 24	(1.4, 0, -0.254)

表 3 管道轴向最大应变点应变值(Taft 波)

Table 3 The strain value of the maximum axial strain point of the pipe(Taft wave)				
工况	最大拉应变	最大拉应变点坐标	最大压应变	最大压应变点坐标
波速 500 m/s	0.017 15	(24.6, 0.235, -0.097)	-0.017 13	(24.6, -0.235, -0.097)
波速 1 000 m/s	0.002 22	(145.4, -0.254, 0)	-0.002 22	(145.4, 0.254, 0)
一致激励	0.000 25	(152, 0, 0.254)	-0.000 18	(150.6, 0, -0.254)

表 4 管道轴向最大应变点应变值(天津波)

Table 4 The strain value of the maximum axial strain point of the pipe(Tianjin wave)				
工况	最大拉应变	最大拉应变点坐标	最大压应变	最大压应变点坐标
波速 500 m/s	0.000 73	(37.4, -0.254, 0)	-0.000 73	(37.4, 0.254, 0)
波速 1 000 m/s	0.000 71	(84.6, 0.180, -0.180)	-0.000 72	(79.4, 0.180, -0.180)
一致激励	0.000 03	(152, 0, 0.254)	0.000 02	(150.6, 0, -0.254)

参考文献(References)

[1] 赵成刚,冯启民.生命线地震工程[M].北京:地震出版社,1994.
ZHAO Chenggang, FENG Qimin. Lifeline Earthquake Engineering[M]. Beijing: Seismological Press, 1994.

[2] 李杰.生命线工程抗震—基础理论与应用[M].北京:科学出版社,2005.

[3] 李初晔,王增新.结构动力学方程的显式与隐式数值计算[J].航空计算技术,2010,40(1):58-62,66.
LI Chuyue, WANG Zengxin. Structural Dynamics Equations of the Explicit and Implicit Algorithm[J]. Aeronautical Computer

- Technique, 2010, 40(1): 58-62, 66.
- [4] 林家浩, 张亚辉, 赵岩. 大跨度结构抗震分析方法及近期进展[J]. 力学进展, 2001, 31(3): 350-360.
LIN Jiahao, ZHANG Yahui, ZHAO Yan. Seismic Analysis Methods of Long-Span Structures and Recent Advances[J]. Advances in Mechanics, 2001, 31(3): 350-360.
- [5] 江洋. 大跨建筑结构多点输入地震响应计算与抗震设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
JIANG Yang. Research on the Earthquake Response Analyses and Seismic Design Methods for Large-Span Building Structures under Multi-Support Excitations[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [6] 周艺, 韦小浩, 张陶. 地震动功率谱模型综述[J]. 中国科技信息, 2010, (24): 54-56.
ZHOU Yi, WEI Xiaohao, ZHANG Tao. Review of Ground Motion Power Spectrum Models[J]. China Science and Technology Information, 2010, (24): 54-56.
- [7] 杨俊. 集集地震地震动衰减特性和相关性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
YANG Jun. A Study of Ground Motion Attenuation Characteristics and Spatial Correlation in Chi-Chi Earthquake[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [8] 田玉基, 杨庆山. 基于相位差谱的空间相关非平稳地震动场的模拟[J]. 计算力学学报, 2010, 27(5): 828-833.
TIAN Yuji, YANG Qingshan. Phase-difference-based Simulation of Spatial Correlated and Non-stationary Seismic Ground Motions[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(5): 828-833.
- [9] 潘旦光, 楼梦麟, 范立础. 多点输入下大跨度结构地震反应分析研究现状[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(10): 1213-1219.
PAN Danguang, LOU Menglin, FAN Lichu. Status of Seismic Response Analysis of Long-span Structures under Multiple Support Excitations[J]. Journal of Tongji University, 2001, 29(10): 1213-1219.
- [10] 王岱, 屈铁军, 梁建文. 地震动空间相关性对地下连续管线的影响[J]. 振动工程学报, 2010, 23(2): 145-150.
WANG Dai, QU Tiejun, LIANG Jianwen. Effect of Spatial Coherence of Seismic Ground Motions on Underground Continuous Pipeline[J]. Journal of Vibration Engineering, 2010, 23(2): 145-150. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2010.02.004.
- [11] 杜修力, 陈厚群. 地震动随机模拟及其参数确定方法[J]. 地震工程与工程振动, 1994, 14(4): 1-5.
DU Xiuli, CHEN Houqun. Random Simulation and Its Parameter Determination Method of Earthquake Ground Motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(4): 1-5.
- [12] 杜修力, 胡晓. 强震地运动随机过程模拟[J]. 地震学报, 1995, 17(1): 103-109.
DU Xiuli, HU Xiao. Stochastic Process Simulation of Strong Earthquake Motion[J]. Acta Seismologica Sinica, 1995, 17(1): 103-109.
- [13] 陈仁福. 大跨悬索桥理论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2015.
CHEN Renfu. Theory of Long-Span Suspension Bridge[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2015.
- [14] 屈铁军, 王君杰, 王前信. 空间变化的地震动功率谱的实用模型[J]. 地震学报, 1996, 18(1): 55-62.
QU Tiejun, WANG Junjie, WANG Qianxin. A Practical Model of Ground Motion Power Spectrum with Spatial Variation[J]. Acta Seismologica Sinica, 1996, 18(1): 55-62.
- [15] VANMARCKE E H, FENTON G A. Conditioned Simulation of Local Fields of Earthquake Ground Motion[J]. Structural Safety, 1991, 10(1-3): 247-264.
- [16] AMIN M, ANG A H S. Nonstationary Stochastic Model for Strongy, Motions Earthquake[J]. Proc. Amer. Soc. Civil Engineering, 1968, 94.
- [17] 薛素铎, 王雪生, 曹资. 基于新抗震规范的地震动随机模型参数研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(5): 5-10.
XUE Suduo, WANG Xuesheng, CAO Zi. Parameters Study on Seismic Random Model Based on the New Seismic Code[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(5): 5-10.
- [18] HAO H. Effects of Spatial Variation of Ground Motion on Large Multiply-supported Structures[R]. No. UCB/EERC-89-06, 1989.