

文章编号: 1674—8247(2022)02—0001—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.02.001

基于信号精度分析的高速铁路沿线测震井 地震动力反应研究

王强¹ 袁成² 习博³ 杜广宇³ 刘洋⁴

(1. 中国国家铁路集团有限公司, 北京 100844; 2. 西南交通大学, 成都 610031;
3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063; 4. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:地震是对高速列车安全运营威胁最大的自然灾害之一。地震预警技术是当前减轻或避免地震对高速铁路危害的重要措施,日本、法国及中国相继建立了高速铁路地震预警系统。现阶段高速铁路地震预警系统测震井问题仍然突出。然而以往的研究很少有对测震井自身参数对监测精度的影响进行研究。随着运行速度的增加,将会对测震井的关键设计参数提出更加严格的标准,因此需要测震井关键设计参数开展系统研究。本文通过建立数值仿真分析模型,输入不同类型、不同强度的地震波研究测震井的动力特征以及对监测精度的影响。通过研究发现,地震波在传递至测震井时具有放大效应,综合不同工况的计算结果,提出了建议测震井尺寸。

关键词:测震井; 地震预警; 高速铁路; 动力响应; 信号分析

中图分类号:U238 **文献标志码:**A

1

A Study on Seismic Dynamic Response of Seismometer Wells along High-speed Railways based on Signal Accuracy Analysis

WANG Qiang¹ YUAN Cheng² XI Bo³ DU Guangyu³ LIU Yang⁴

(1. China Railway, Beijing 100844, China;
2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
3. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China;
4. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Earthquake is one of the natural disasters that pose the greatest threat to the operation safety of high-speed trains. Japan, France, and China have successively established earthquake early-warning systems for high-speed railways, since it is recognized as a currently important measure to reduce or avoid the damage of earthquakes to high-speed railways. At present, the problem of seismometer wells in high-speed railway seismic early warning systems is still prominent. However, few previous studies focused on the influence of seismometer well parameters on monitoring accuracy. As the operation speed increases, more stringent standards will be proposed for the key design parameters of seismometer wells, therefore it is necessary to study the key design parameters of seismometer wells in a systematic manner. In this paper, a numerical simulation analysis model was established, and different types of seismic waves with different intensities were input to study the dynamic characteristics of seismometer wells and the impact on monitoring

收稿日期:2022-03-01

作者简介:王强(1970-),男,高级工程师。

基金项目:四川省科技支撑计划应用基础研究计划重点项目(20YYJC0720)

引文格式:王强,袁成,习博,等. 基于信号精度分析的高速铁路沿线测震井地震动力反应研究[J]. 高速铁路技术,2022,13(2):1-5.

WANG Qiang, YUAN Cheng, XI Bo, et al. A Study on Seismic Dynamic Response of Seismometer Wells along High-speed Railways based on Signal Accuracy Analysis[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2):1-5.

accuracy. The results show that the seismic wave has an amplification effect when transmitted to the seismometer well. Based on the calculation results of different cases, the suggested size of the seismometer well is proposed.

Key words: seismometer wells; earthquake early warning; high-speed railway; dynamic response; signal analysis

地震是一种发生概率小但对铁路行车安全危害性极大的突发性自然灾害,往往会在极短时间内造成十分严重的灾害损失和人员伤亡^[1-3]。特别是当列车运行速度达到200 km/h以上时,地震对路基、桥梁、轨道等结构的冲击可能导致危害旅客生命安全的重大事故。地震是高速铁路运营安全的重要隐患,高速铁路较为发达的日本、法国、德国、韩国以及中国台湾地区等,均建立了地震监测与紧急处置系统,以防止或减轻地震灾害对铁路运输安全的危害。按照报警时效性来分,地震监控系统一般分为报警系统和预警系统两类。地震报警系统主要通过监测S波,当地震动加速度达到一定阈值后发出警报,采取相应应急措施减少灾害损失;而地震预警技术则是利用P波和S波的速度差(本地预警)、电信号和地震波的速度差(异地预警),在地震发生后,当破坏性地震波尚未来袭前发出预警,从而采取相应措施,避免重大的人员伤亡和经济损失^[4]。

在目前地震预报技术还很不成熟的情况下,发展地震预警技术是减轻或避免地震对高速铁路危害的重要措施^[5]。因此,相继建立了高速铁路地震预警系统^[6-8]。测震井是高速铁路地震预警系统中重要的组成部分。然而现阶段高速铁路地震预警系统的测震井问题仍然比较突出,且随着运行速度的增加,将对测震井的关键设计参数提出了更加严格的标准。因此需对测震井关键设计参数开展系统研究,提出需求建议。梳理运营期间地震预警系统测震井问题后,重点关注测震井在几何尺寸方面存在的问题,提出解决措施建议。

本文通过建立数值仿真分析模型,施加地震波,研究测震井设置深度及截面尺寸对地震动监测精度的影响。研究发现,测震井几何尺寸对测量精度有一定的影响,地震波在测震井中的传播具有放大效应。

1 几何模型及计算方法

建立仪器墩-测震井-土体耦合地震模型,固定仪器墩尺寸为0.4 m×0.4 m×0.1 m,调整测震井截面尺寸和深度,研究测震井尺寸对监测精度的影响。设计4组几何模型,改变测震井长宽高的尺寸如表1所示,分别对各个几何模型施加3种强度下的3种地震波进行加速度响应分析,即每组几何模型进行3个

工况的分析,总共12个工况。在本节的分析中,模型尺寸为15 m×15 m×50 m。土体采用M-C本构模型,弹性模量50 MPa,泊松比为0.3,内摩擦角为20°,粘聚力为20 kPa,密度为1.8 g/cm³。边界条件为:仪器墩与测震井绑定连接,模型顶面与测震井顶面标高相同;地震作用以加速度时程的方式施加在模型底部,底部的侧向和纵向加速度为0;模型水平振动方向侧面上等高度的点位移相同,施加多点耦合约束;模型四周边界面上的纵向位移被限制,这种边界条件被称为“free horizontal& zero vertical”,在国内外地震荷载的模拟中广泛应用,取得了较好的结果^[9-11]。

表1 数值模拟中的几何模型、地震波类型及动强度表

几何编号	测震井尺寸/m	输入震波类型
S6	3×3×6	EL control波, Kobe波, Wc波,地震动强度0.2g
S7	3×3×4	EL control波, Kobe波, Wc波,地震动强度0.2g
S8	3×3×8	EL control波, Kobe波, Wc波,地震动强度0.2g
S9	4×4×6	EL control波, Kobe波, Wc波,地震动强度0.2g

2 模态和自振频率分析

由于测震井尺寸较土域的范围相对较小,故整个模型的自振频率主要由土体决定,不同几何模型的自振特性差异不大,故本节以几何工况S6为代表,进行水平方向的自振频率和模态分析,研究带测震井场地的基本动力特性。在Abaqus频率分析步中计算得到水平方向的前4阶位移阵型如图1所示。从图1可以看出,阵型的位移云图呈明显的水平分层分布,前4阶自振频率分别为0.4 Hz,1.2 Hz,2.0 Hz和2.8 Hz,频率间隔均为0.8 Hz。由一维场地地震波传播理论可知,自由场地的1阶频率为 $V_s/(4H)$,其中 V 是土体剪切波速, H 为上覆土层厚度。模型中的场地弹模50 MPa,剪切波速为103.4 m/s,土层厚50 m,一维理论计算得到的1阶自振频率为0.51,略大于三维有限元中得到的结果,这是由于一维假设下,所有质点的纵向位移和侧向位移被假设为0,使得一维模型刚度大于实际三维条件的缘故。此外,观察不同阵型测震井处的位移可知,在低阶振型下,测震井顶面左右的位移几乎相同,而随着振型阶数增加,测震井顶面位移分布不再水平,离地震作用方向较近的一侧(即图1(d)中左侧)位移会超过右侧,测震井会出现一定程度的“摇

摆振动”,而测震井周围的土体振动也随之受到影响。

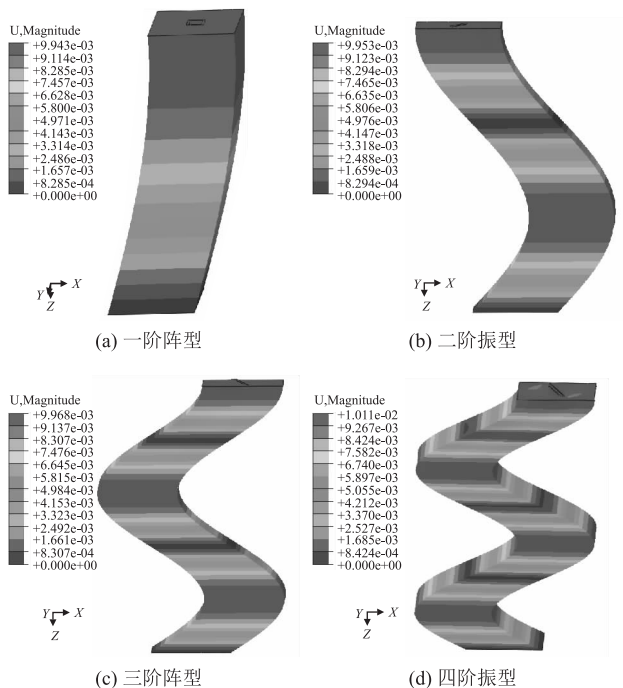


图1 测震井-土场地前四阶振型图

3 测震井周围土体加速度时程曲线对比

选取几何模型 S6 在 3 种地震波作用下,测震井周围 1 m 处土场地的加速度进行分析。输入地震加速度,以及仪器墩顶部监测得到加速度时间曲线分别如图 2 所示。从图 2 可以看出,各个监测点信号出现的时间不同,这是因为地震波由基岩向地面方向传递,经过不同深度的监测点时存在时间差。在 EL Centrol 波,地震动强度 0.2g 的工况下,加速度从土域底部传递至监测信号处土体放大程度较小,从监测信号处土域传递至土域顶面放大明显。土域底面监测点的加速度峰值为 0.199 m/s^2 ,监测信号处土体加速度峰值为 0.200 m/s^2 ,土域底面的加速度峰值为 0.375 m/s^2 。在 Kobe 波和 Wc 波时也有相同的特征。这是因为测震井刚度大于土体,地震波传递至测震井会出现放大效应,从而影响周围土体的振动。

4 地震过程的加速度云图

以几何模型 S6 在 EL centrol 波作用下的计算模型为代表,输入地震动 0.2g,分析不同时刻加速度传播特征。将不同时刻模型加速度绘制在变形图上,如图 3 所示。从图 3 可以看出,初始时刻尚未施加地震作用,整个模型的加速度均为 0;0.102 s 时刻,底部区域在地震作用下发生位移,加速度有明显的分层现象,

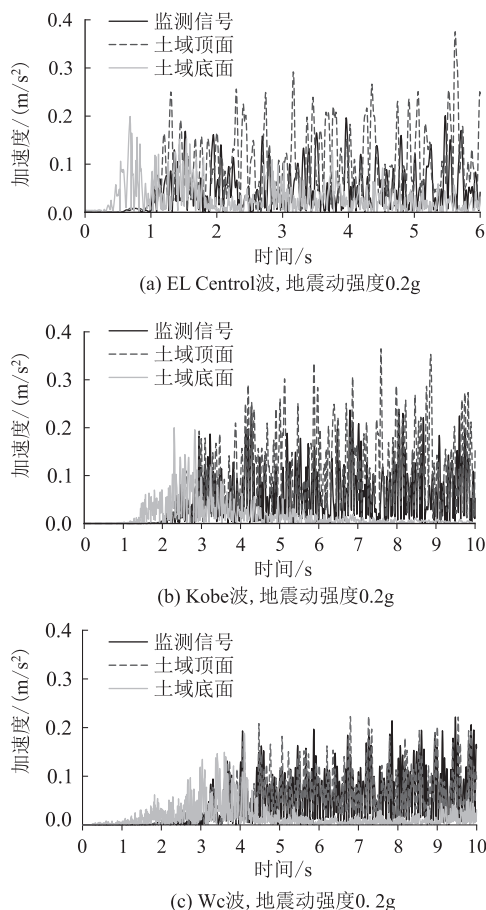


图2 不同地震波作用下几何模型 S6 的加速度时间曲线图

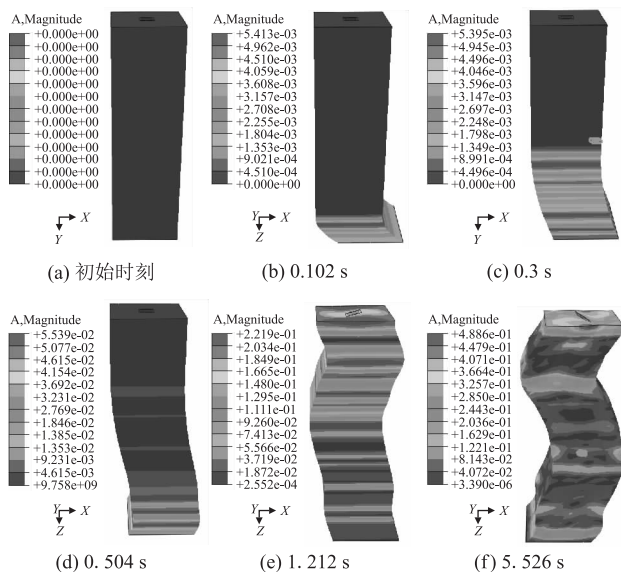


图3 不同时刻场地中加速度传播(几何模型 S6,EL centrol 地震波)图

且振动正在朝模型顶部传播;0.3 s 时刻,振动继续朝模型顶部传播,传播到达的区域均会发生相应的变形,振动波未到达的区域则没有加速度和位移;0.504 s 时刻,振动波首次达到顶部,此时模型顶部加速度最小,为 10^{-9} m/s^2 数量级;1.212 s 时刻,携带最大能量的输

入波信号波到达模型顶部,此时模型顶部的加速度信号达到局部最大,但由于仍有后续波到达,此时模型顶部加速度信号仍未到达最大;5.526 s时刻,模型顶部加速度达到最大,测震井周围土域的信号也达到最大。

提取加速度最大时刻的测震井模型位移云图如图4所示。从图4可以看出,测震井周围土体的位移较测震井相对较大,场地土的位移以剪切变形为主,而测震井由于尺寸较小,自身应变较小,其变形主要是水平向的刚体位移为主。

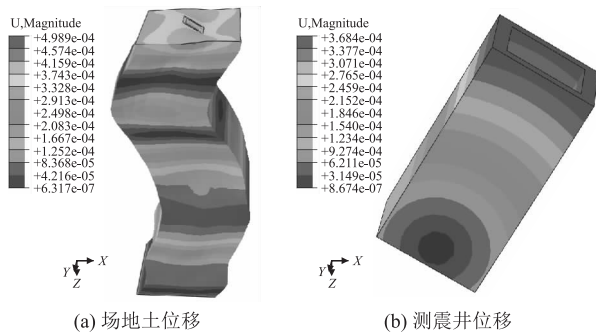


图4 测震井模型位移云图(加速度最大时刻)

应力最大时刻测震井和仪器墩的位移云图如图5所示。从图5可以看出,地震作用下测震井最大应力出现在测震井底部4个角点处,这主要是应力集中导致的。总体上,测震井和仪器墩的应力较小,对混凝土材料,尚未进入塑性变形,结构安全。

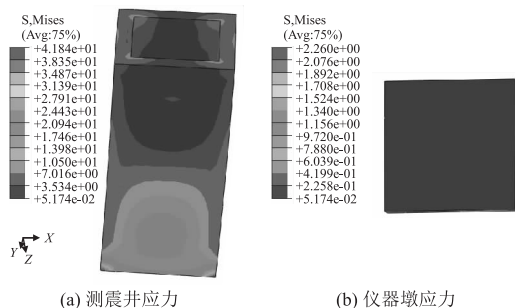


图5 测震井和仪器墩的应力云图(5.478 s)

5 不同尺寸测震井周围土体加速度PGA放大系数比较分析

将不同几何尺寸测震井周围土体的加速度峰值(PGA)除以模型底部的加速度进行归一化,即为PGA放大系数。3种地震波作用下测震井几何尺寸与PGA放大系数之间的关系曲线如图6所示。从图6可以看出,不同测震井尺寸下土域顶面的加速度均会放大,几何编号为S6的模型土域顶面PGA放大系数最大。与底部输入信号相比,仪器墩顶部的PGA放大系数也有一定程度放大,总体上,汶川波的放大系数较El centrol波和Kobe小,这是由于汶川波本身的卓越频率较场地

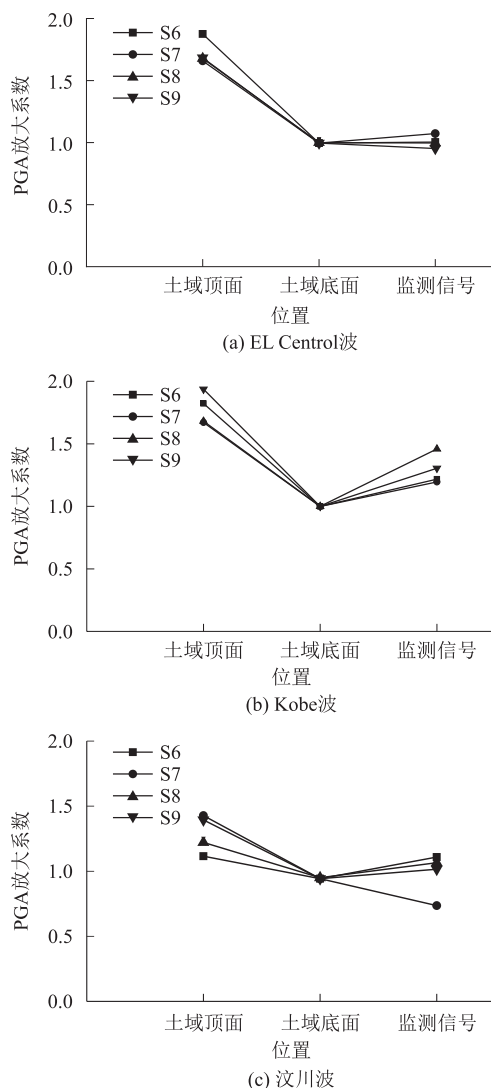


图6 不同地震波作用下测震井几何尺寸与PGA放大系数之间的关系图

卓越频率偏离最多的缘故。仪器墩的信号与地震输入信号较为接近,放大系数一般都小于1.5,反映出测震井可以监测到较为准确的地震信号。另外,对于Kobe波和汶川波,测震井埋深越深,测震井周围的土体加速度信号越大,主要是由于测震井结构为混凝土制成,自身刚度远大于周围土体,在波传播过程中能量会朝着刚度大的区域聚集,导致测震井周围土体振动比自同等条件下的自由场振动剧烈。

在测震井尺寸对PGA放大系数的影响方面,不同几何模型下土域顶部和仪器墩的PGA放大系数与波型密切相关。EL centrol波作用下,监测信号与地震输入信号之间差别较小,埋深最浅的工况S7的监测信号最大,井横向最宽的工况S9的监测信号最小,S9工况下的监测信号甚至略小于地震输入信号。Kobe波作用下,埋深最深的工况S8监测信号最大,其次是S9;S6和S7的监测信号最小,且二者较为接近,PGA放大

系数约为1.2左右。汶川波作用下,埋深最浅的工况S7放大系数最小,仅为0.74左右,S9的放大系数为1.01,S6的放大系数最大,为1.12。

S6和S9工况深度相同,S9截面尺寸大于S6。整体来看S6和S9工况在地震波作用下监测信号的放大系数接近,截面尺寸对监测信号的影响不大。S6、S7、S8工况截面尺寸相同,S7深度最小,S8深度最大。在EL centrol波作用下3种工况的放大系数比较接近,然而在Kobe波作用下深度最大的S8工况放大系数最大,深度最小的S7工况放大系数最小。在汶川波作用下,S7工况的放大系数小于1,其他工况放大系数较为接近。可以看出,测震井深度对监测信号的影响较大,且有深度越大时,监测误差越大的趋势。

综合4种测震井尺寸在3种地震波作用下的响应分析,几何编号为S6和S7下的仪器墩顶部PGA放大系数与输入信号最为接近。考虑到汶川波作用下,S7工况下的监测信号会略小于输入信号,对安全防护不利,故建议选用S6工况下的测震井设计,即长宽高分别为3 m、3 m、6 m。

6 结论

本文建立了地震作用下的测震井动力响应模型,研究了地震波类型,输入地震动强度,测震井几何设计尺寸对仪器墩监测地震信号精度的影响,得到以下结论:

(1)在3种地震波作用下,加速度从土域底部传递至土域顶面的过程都具有放大趋势,特别是在靠近测震井时,土体加速度的放大效应更为明显。这是因为测震井刚度大于土体,地震波传递至测震井会出现放大效应,从而影响周围土体的振动。

(2)场地土的位移以剪切变形为主,而测震井由于尺寸较小,自身应变较小,其变形主要是水平向的刚体位移为主。地震作用下测震井最大应力出现在测震井底部4个角点处,这主要是应力集中导致的。

(3)综合4种测震井尺寸在3种地震波作用下的响应分析,从提升动强度较大时的地震预警精度角度考虑,施工条件允许的情况下,建议测震井尺寸为3 m×3 m×6 m。

参考文献:

[1] 陈国兴,陈继华.地震动输入界面的选取对深软场地地震效应的影响[J].世界地震工程,2005,21(2):36-43.
CHEN Guoxing, CHEN Jihua. A Study on the Influence of Seismic Wave Inputting Interface on the Earthquake Response of Deep Soft Sites[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2005, 21(2): 36-43.

[2] 刘林,阎贵平,辛学忠.京沪高速铁路地震预警系统的方案及关键参数研究[J].中国安全科学学报,2002,12(4):75-79.
LIU Lin, YAN Guiping, XIN Xuezhong. Study on Schemes and Key Parameters of Seismic Alarm System for Beijing-Shanghai Express Railway[J]. China Safety Science Journal, 2002, 12(4): 75-79.

[3] 侯圣杰,刘先恺,汤凯谊,等.高速磁浮交通环境与灾害监测预警系统方案研究[J].高速铁路技术,2022,13(1):7-11.
HOU Shengjie, LIU Xiankai, TANG Kaiyi, et al. Study on Plan of High-speed Maglev Traffic Environment and Disaster Monitoring and Early Warning System[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1): 7-11.

[4] 张骞.基于耦合系统动力学仿真的高速铁路地震监测预警阈值研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2014.
ZHANG Qian. Research on the Reshold of Earthquake Early Warning for High-speed Railways Based on Coupling System Dynamics Simulation[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2014.

[5] 孙利.高速铁路地震预警系统阈值探索[D].大连:大连理工大学,2011.
SUN Li. Study on Acceleration Threshold for Train Control in Earthquake Early Warning System for High-speed Railways [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.

[6] 宋晋东,李山有.地震预警中两种利用卓越周期估算震级方法的比较[J].地震工程与工程振动,2012,32(6):174-181.
SONG Jindong, LI Shanyou. A Comparison between Two Magnitude Estimating Methods Using Predominant Period in Earthquake Early Warning[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(6): 174-181.

[7] 王国新,孙奉勍,王东明.高速铁路地震预警时间与预警区域和震级的关系[J].中国铁道科学,2014,35(2):120-124.
WANG Guoxin, SUN Fengjie, WANG Dongming. The Relationship between Early Warning Time & Region of High Speed Railway and Earthquake Magnitude[J]. China Railway Science, 2014, 35(2): 120-124.

[8] 陈仁朋,王作洲,蒋红光,等.I型轨道-路基系统动力荷载放大系数模型试验研究[J].岩土力学,2013,34(4):1045-1052.
CHEN Renpeng, WANG Zuo Zhou, JIANG Hongguang, et al. Experimental Study of Dynamic Load Magnification Factor for Type I Track-Subgrade System [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1045-1052.

[9] 苑举卫,杜成斌,陈灯红.基于ABAQUS的三维粘弹性边界单元及地震动输入方法研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2010,32(3):9-13.
YUAN Juwei, DU Chengbin, CHEN Denghong. Study of 3D Viscoelastic Boundary Elements Based on ABAQUS and Earthquake Input Method[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2010, 32(3): 9-13.

[10] 何建涛,马怀发,张伯艳,等.黏弹性人工边界地震动输入方法及实现[J].水利学报,2010,41(8):960-969.
HE Jiantao, MA Huai fa, ZHANG Boyan, et al. Method and Realization of Seismic Motion Input of Viscous-Spring Boundary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8): 960-969.

[11] 马笙杰,迟明杰,陈红娟,等.黏弹性人工边界在ABAQUS中的实现及地震动输入方法的比较研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(7):1445-1457.
MA Shengjie, CHI Mingjie, CHEN Hongjuan, et al. Implementation of Viscous-Spring Boundary in ABAQUS and Comparative Study on Seismic Motion Input Methods [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7): 1445-1457.