

高铁地震预警系统中测震井尺寸对地震监测信号的影响研究

龚新明¹ 冯康² 王强³ 王峰³ 马浩² 杜广宇² 杨长卫¹

1. 西南交通大学, 中国·四川 成都 610031

2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 中国·湖北 武汉 430063

3. 中国国家铁路集团有限公司, 中国·北京 100844

摘要: 通过有限元软件建立仪器墩-测震井-土体耦合地震模型, 得到不同输入地震波强度作用下仪器墩的响应加速度, 探究了不同几何尺寸仪器墩顶部与底部响应加速度的相对误差变化规律。研究表明: 相同横截面积情况下, 仪器墩高度较小时其顶部与底部的响应加速度相对误差较小, 相同高度情况下, 仪器墩横截面积较大时其顶部与底部的响应加速度相对误差较小; 同一尺寸仪器墩对不同地震波的加速度响应不同, 高度较大的仪器墩会出现低估地震动强度的情况; 在输入地震动强度较小时, 仪器墩在高阈值时响应加速度的相对误差更小, 在输入地震动强度较大时, 仪器墩在低阈值时响应加速度的相对误差更小。

关键词: 高速铁路; 地震预警; 测震井; 误差分析; 数值模拟

Research on the Influence of Seismic Well Size on Earthquake Monitoring Signals in High-speed Railway Earthquake Warning System

Xinming Gong¹ Kang Feng² Qiang Wang³ Feng Wang³ Hao Ma² Guangyu Du² Changwei Yang¹

1. Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan, 610031, China

2. China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430063, China

3. China National Railway Group Co., Ltd., Beijing, 100844, China

Abstract: A finite element software was used to establish a coupled seismic model of instrument pier seismic well soil, and the response acceleration of instrument pier under different input seismic wave intensities was obtained. The relative error variation law of response acceleration at the top and bottom of instrument pier with different geometric sizes was explored. The research results show that under the same cross-sectional area, when the height of the instrument pier is small, the relative error of the response acceleration at the top and bottom is small. At the same height, when the cross-sectional area of the instrument pier is large, the relative error of the response acceleration at the top and bottom is small; the acceleration response of the same sized instrument pier to different seismic waves varies, and instrument piers with higher heights may underestimate the seismic intensity; when the input seismic intensity is low, the relative error of the instrument pier in response to acceleration is smaller at high thresholds, and when the input seismic intensity is high, the relative error of the instrument pier in response to acceleration is smaller at low thresholds.

Keywords: high-speed railway; earthquake warning; seismic well; error analysis; numerical simulation

0 前言

当前中国已经建成世界上规模最大的高速铁路网络, 随着铁路列车运行速度的提高, 地震成为高速铁路运营安全的严重隐患^[1-2]。当铁路列车的运行速度达到 200km/h 以上时, 列车运行对轨道平顺性要求更高, 较小震级(立式 4 级左右)的地震即有可能引发列车脱轨。2004 年日本中越地区发生 6.8 级地震, 造成日本新干线脱轨, 经过数日抢修线路才恢复通车, 造成严重的经济损失^[3]。高速铁路发展较为成熟的法国、日本、德国等都建立了较为完善的高铁地震预警系统^[4]。中国高铁地震预警系统的发展也日臻成熟, 取得

应用的线路包括京沪高铁、成渝高铁、京张高铁等。

地震预警主要通过 P 波与 S 波的速度差以及地震波与电磁波的速度差来实现, 能够在破坏性强的 S 波到达之前采取措施, 以降低人员伤亡及财产损失。当前已有许多学者对地震预警开展了研究, 在地震预警系统架构设计^[5]、地震预警实时性与准确性分析^[6]、地震预警系统警报阈值及处置策略^[7-9]等方面都取得了显著成果。

论文在已有研究成果的基础上, 使用 ABAQUS 软件对高铁地震预警系统中测震井的动力响应开展研究, 对比不同地震动强度、不同几何尺寸下仪器墩的响应加速度相对误

差，确定仪器墩的最优几何尺寸，以提高地震仪监测得到的地震动信号的准确性。

1 模型建立

1.1 几何模型

在 ABAQUS 软件中建立如图 1 所示的仪器墩 - 测震井 - 土体耦合地震模型。在本节的分析中，土体尺寸为 15m × 15m × 6m，测试井尺寸 3m × 3m × 6m，土体分析区域为在水平面上是测试井的 5 倍，土体尺寸在仪器墩尺寸的 30 倍以上，可有效减小边界截断对仪器墩响应的影响。

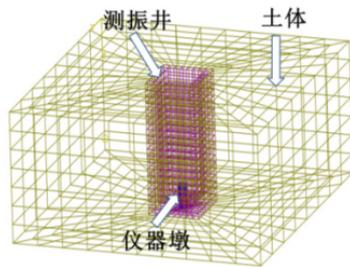


图 1 仪器墩 - 测振井 - 土体耦合地震模型

1.2 模型参数设置

土体使用摩尔库伦理想塑性结构模型，即发生塑性变形过程中黏聚力不变。采用均质各向同性土参数，土体容重为 18kN/m³，黏聚力 20kPa，摩擦角 20°，泊松比 0.3，弹性模量设置为 50MPa。测振井和加速度安装台均为混凝土材料，密度 25kN/m³，弹性模量 30GPa，泊松比 0.17，使用线弹性本构。在模型底部沿地震作用方向施加加速度时程曲线模拟地震动荷载，模型底部其他方向约束位移。

1.3 工况设置

设计 3 组几何模型，各工况仪器墩长宽高的尺寸如表 1 所示，分别对各个几何模型施加 3 种强度下的 2 种地震波进行加速度响应分析，主要关注仪器墩顶部和底部的响应差别，即每组几何模型进行 6 个工况的分析。

表 1 数值模拟中的尺寸、地震波类型及动强度

编号	仪器墩尺寸 (长 × 宽 × 高, m)	输入地震波类型	地震动强度 (g)
S1	0.4 × 0.4 × 0.6	EL control 波, Wc 波	0.1, 0.2, 0.4
S2	0.6 × 0.6 × 0.6	EL control 波, Wc 波	0.1, 0.2, 0.4
S3	0.4 × 0.4 × 0.1	EL control 波, Wc 波	0.1, 0.2, 0.4

计算 El Control 地震波以及汶川地震波下仪器墩动力响应与地震输入响应在 40gal、80gal、120gal 以及峰值时刻的响应差别，输入地震动强度为 0.1g、0.2g、0.4g。

2 仿真结果及分析

2.1 地震作用下的测震井时程响应

仪器墩的加速度峰值方向与输入地震波方向相同，但也有轻微的横向与竖向振动。图 3 是几何模型 S1 受 0.1g 幅

值的 El Control 波作用下，仪器墩顶部和底部的加速度响应比较。当输入地震动峰值为 0.1g 时，仪器墩顶部响应加速度峰值为 0.106g，底部响应加速度峰值为 0.099g。仪器墩底部响应加速度峰值与输入地震动峰值基本一致，顶部响应加速度呈现一定的放大效应，在此工况下增大了约 7%。除峰值位置之外，在其他位置顶部响应加速度也呈现出略大于底部响应加速度的规律。

在地震动方向，仪器墩顶部的加速度响应略大于仪器墩底部，但总体差别较小。

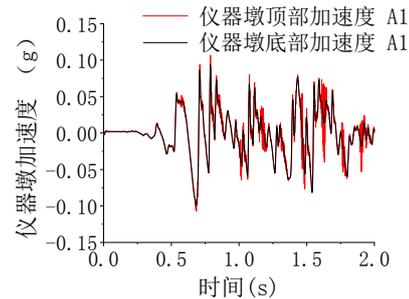


图 3 仪器墩顶部和底部的加速度时程曲线

2.2 不同地震波类型及动强度下仪器墩顶部和底部响应差别对比

分别提取仪器墩顶部响应加速度 $A_{顶}$ 达到 40gal、80gal、120gal，即加速度 0.04g、0.08g、0.12g 对应时刻的仪器墩底部加速度 $A_{底}$ ，则相对误差可表示为 $(A_{顶} - A_{底}) / A_{顶}$ ，先比较不同地震波类型和动强度下仪器墩顶部和底部的响应差别，如几何模型 S1 下，El control 地震波作用时候仪器墩顶部和底部的响应差别可以记作 EL_S1_up。

El Control 波作用下仪器墩顶部与底部响应加速度的相对误差如图 4 (a) - (c) 所示。以相对误差 5% 为限值，当相对误差小于 5% 时，该尺寸下仪器墩对地震动信号监测效果良好。从图 4 中可以看出，当输入地震动强度为 0.1g 时，不同尺寸的仪器墩响应加速度相对误差均呈现出顶部达到 40gal 时相对误差较大，顶部达到 80gal 时相对误差较小的规律。当输入地震动强度为 0.2g 时，仪器墩顶部响应达到 80gal 时相对误差最大，当顶部参考响应为 40gal、120gal 时其相对误差较小。对比图 4 (a) 与 (b)，相同高度情况下仪器墩横截面尺寸较小时其相对误差较大，仪器墩顶部响应加速度具有更明显的放大效应，横截面积更大的仪器墩具有更佳的监测效果。

汶川波作用下仪器墩顶部与底部响应加速度的相对误差如图 5 (a) - (c) 所示。与 El Control 波作用下的情况相反，当输入地震波为 0.1g 汶川波时，顶部参考响应 40gal 比参考响应 80gal 时的相对误差更小，说明仪器墩对不同地震波的响应情况不同。在 s1、s2、尺寸时均出现了相对误差为负值的情况，即仪器墩顶部响应加速度要小于仪器墩底部，这会导致地震仪监测到的信号低于底部输入信号，低估了地

震动的强度，不宜采用。当输入地震动强度达到 0.4g 时，s3 尺寸仪器墩的响应加速度在顶部达到 40gal 时相对误差为 6.025%，小幅超过 5% 的限值；在顶部响应达到 80gal 时相对误差均接近 0，即顶部与底部响应加速度基本一致，监测效果良好；当顶部响应达到 120gal，响应加速度相对误差分

别为 2.88%，均在 5% 限值内。

综合对比 El Centrol 波与汶川波作用下不同尺寸仪器墩的响应加速度相对误差，仪器墩横截面积较大、高度较小时其相对误差较小，高度过大时仪器墩顶部的响应加速度呈现一定的放大效应，使其误差增大。

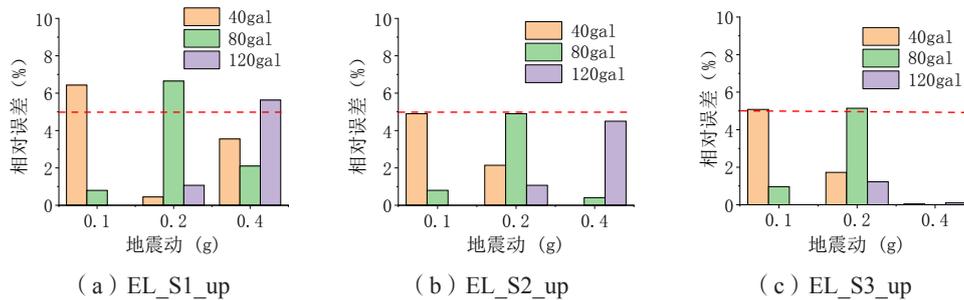


图 4 不同地震动强度下 3 种尺寸仪器墩顶部和底部加速度响应相对误差 (El Centrol 波，仪器墩顶部达到参考响应)

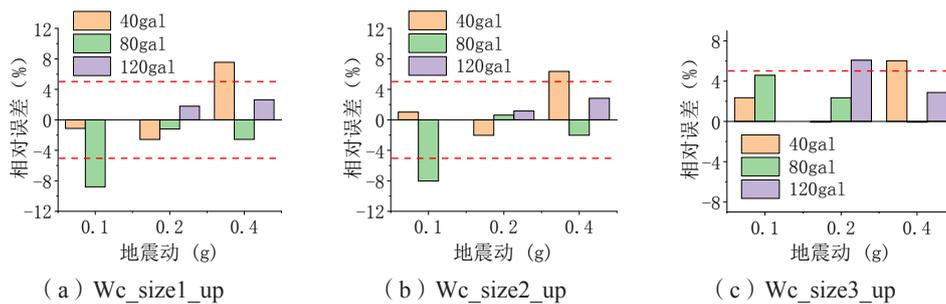


图 5 不同地震动强度下 3 种尺寸仪器墩顶部和底部加速度响应相对误差 (汶川波，仪器墩顶部达到参考响应)

3 结论

通过对不同尺寸仪器墩加载不同强度的地震波进行数值仿真分析，可以得到以下结论：

①相同高度情况下仪器墩横截面尺寸较小时其相对误差较大，仪器墩顶部响应加速度具有更明显的放大效应；仪器墩横截面尺寸相同的情况下，随着仪器墩高度的增加在较大输入地震动强度时顶部响应加速度相对误差增大明显，高度较小的仪器墩具有更好的地震动监测精度。

②不同输入地震波类型工况下，仪器墩的响应加速度存在差异，降低仪器墩高度在不同地震波输入下均能降低顶部响应加速度的相对误差。

③不同输入地震波强度作用下，仪器墩顶部达到某一阈值时其监测准确度不同，输入地震波强度较小时，仪器墩顶部达到较大阈值时相对误差较小，输入地震波强度较大时，仪器墩顶部达到较小阈值时相对误差较小。

参考文献：

[1] 张志方.我国高速铁路地震预警技术的创新与思考[J].中国铁路,2014(6):24-27.

[2] 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.

[3] 易忠来,杨志强,靳昊,等.高速铁路无砟轨道突发灾害及应急抢修技术[J].铁道建筑,2023,63(8):17-21.

[4] 马强.地震预警技术研究及应用[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2008.

[5] 江汶乡,于海英,黄磊.高速铁路地震预警系统构架设计[J].自然灾害学报,2014,23(1):81-86.

[6] 王澜,戴贤春,习年生,等.基于概率模型的高速铁路地震预警实时性与准确性分析[J].中国铁道科学,2018,39(1):131-137.

[7] 孙汉武,王澜,戴贤春,等.高速铁路地震紧急自动处置系统的研究[J].中国铁道科学,2007(5):121-127.

[8] 杨长卫,童心豪,连静,等.高速铁路地震预警系统三级警报阈值及其处置策略研究[J].铁道学报,2019,41(7):88-94.

[9] 魏峰,张志方,高亮.地震作用下车辆-轨道-桥梁系统振动台阵列试验与列车预警速度阈值研究[J].铁道学报,2018,40(3):101-106.

基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划（项目编号：N2023G022）。