

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202006023

VP型宽频带倾斜仪的同震响应衰减关系研究*

何 斌, 苏泽云, 章 东, 江昊琳

(江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

摘要: 基于徐州台和常熟台2套VP型宽频带倾斜仪记录到的186次同震形变波, 统计分析其振幅-震级特征, 分区对比研究其衰减关系, 结合观测资料计算仪器特征参数, 通过岩芯试验获取场地基岩性质, 综合分析仪器观测效能。结果表明:(1)相比于常熟台, 徐州台的NS向和EW向拟合均较为稳定, 记震能力更好;(2)不同构造分区中拟合的振幅-震级关系, 随着震中距增大, 最大振幅幅值呈指数上升且拟合程度显著增强;(3)仪器基墩稳定性对同震响应存在一定的影响, 基墩稳定性好, 观测数据年零漂小, 同震记录相对稳定;不同岩性的基墩对同震记录的敏感性存在差异, 同震响应振幅与基墩弹性模量成反比。

关键词: VP型宽频带倾斜仪; 同震响应; 振幅-震级; 衰减关系

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0650-07

Study on the Attenuation Relationship of Co-seismic Response on the VP Broadband Tiltmeter

HE Bin, SU Zeyun, ZHANG Dong, JIANG Haolin
(Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

Abstract: Based on 186 co-seismic responses recorded by 2 sets of VP-type broadband tiltmeters in Xuzhou and Changshu stations, statistical analyses of the characteristics of amplitude - magnitude and attenuation relationship are conducted. The results show that (1) Compared with the Changshu station, the fitting of NS and EW directions of the Xuzhou station is relatively stable, having better seismic capacity; (2) According to the fitted amplitude - magnitude relationship in different tectonic structures, the maximum amplitude exponentially rises and the goodness of fit increases with the increase of epicentral distance. In addition, the characteristic parameters of the instrument were calculated based on the observed data, and the bedrock properties of the site were obtained through the core test. (3) The stability of the instrument base pier has a certain influence on the co-seismic response. The stability of the base pier is good, the observation data has a small annual drift, and the co-seismic record is relatively stable. The sensitivity of the piers of different lithologies to the co-seismic records is different, and the amplitude of the co-seismic response is inversely proportional to the elastic modulus of the piers.

Keywords: VP-type broadband tiltmeter; co-seismic response; amplitude-magnitude; attenuation relationship

* 收稿日期:2020-04-16;修回日期:2020-09-20

基金项目:中国地震局“三结合”课题(3JH-202002009)、江苏省产业前瞻与关键核心技术竞争项目(BE2020116)资助

作者简介:何斌(1985—),女,工程师。主要从事地球物理台网形变观测研究。E-mail:jsdz_hb@126.com

引言

形变观测仪器,诸如倾斜仪、伸缩仪和钻孔应变仪等,观测属性主要是倾斜、应变或应力等,当地震波从震源发射出,经过介质传播到地面,引起地面的振动,借助数字化形变观测仪观测到的波动现象称为同震形变波,以区别地震波,其能量可以用幅值来表示,观测到的同震形变波同样也包含了地震破裂及传播过程中的重要信息。

国内很多学者针对同震形变波进行了横向和纵向的对比研究^[1-9]。方燕勋等^[3]分析了湖州台VP倾斜仪、SSQ秒采样倾斜仪及JCZ-1T测震仪同震时段的响应特性;高明智等^[4]分析了徐州台SQ-70模拟石英水平摆倾斜仪和VP型宽频带倾斜仪的映震能力,捕捉震前的短临信息;龚丽文等^[5]分析黔江台DSQ水管仪和VS垂直摆,对比分析其波谱特征;袁曲等^[6]对宜昌台水管倾斜仪、VP倾斜仪和VS垂直摆进行地震响应对比,同一台址不同倾斜仪的同震响应对比分析表明,VP型宽频带倾斜仪基线短、高采样率,同震响应的信息记录完整;张利兵等^[7]分析了姑咱台和乡城台VS垂直摆;钟天任等^[8]分析了汕头台、韶关台和信宜台VS垂直摆;郭伟等^[9]分析了乌加河台、包头台、乌海台DSQ水管仪的同震响应特性,不同台站同一类倾斜仪的同震响应,差异性可能受台站所处的区域地质构造背景、仪器运行特征参数等因素影响。以往的研究中甚少涉及仪器场地对同震形变波的影响分析,结合仪器工作参数、观测点附近的场地环境等因素的研究对同震形变波的记录分析是有一定意义的。本文尝试结合仪器运行特征参数和场地基岩性质综合分析同震形变波衰减特性的研究。

徐州地震台和常熟地震台均运行中国地震局武汉地震仪器研究所研制的VP型宽频带倾斜仪。VP型宽频带倾斜仪采样率为秒采样,观测人员每

周通过“中国地震前兆台网跟踪分析处理软件”对观测数据进行挖掘分析^[10],提取相关事件记录信息并存入数据库。地震发生后产生的同震响应是VP型宽频带倾斜仪记录的主要事件,本文针对2017~2019年记录到的地震事件进行同震响应振幅—震级统计,主要考虑震中距和震级这两个影响因素,分区对同震形变波衰减特性进行了分析,并结合观测资料计算仪器特征参数,通过岩芯试验获取场地基岩性质,综合分析仪器观测效能和记震能力。

1 地质概况

江苏省地跨华北板块和扬子板块两大一级构造单元,区域内断裂构造较为发育。北东向断裂主要是郟庐断裂带鲁苏皖段,主要由4条主干断裂组成(F_1 — F_4),走向为北北东向,其中江苏段较窄,以第四纪陆相碎屑岩建造为主,根据历史地震重演理论和地质构造类比原则,认为郟庐断裂带鲁苏皖段在泗洪南(王集)—嘉山一带存在发生7级或7级以上强地震的可能性。北西向断裂最为显著的是无锡—宿迁断裂,该断裂带贯穿整个长三角城市群,主要分为3段;无锡-苏州段、洪泽湖-扬州段和聊城-宿迁段,新构造期以大面积的升降运动为主,形成十分发育的平原沉降区,且沿断裂带多次发生过中强地震,如999年常州 $5\frac{1}{2}$ 级地震。围绕着这2条重要断裂带,江苏地球物理台网建设形变综合台站,分别为徐州地震台和常熟地震台。徐州地震台位于郟庐断裂带江苏段西侧,常熟地震台位于无锡-宿迁断裂带苏州-无锡段东侧。

徐州地震台位于徐州市云龙山第八节东坡,VP型宽频带倾斜仪于2013年10月25日起正式投入观测;常熟地震台位于常熟市虞山辛峰亭军用山洞内,VP型宽频带倾斜仪于2015年1月1日起正式投入观测,台基和仪器信息见表1。

表1 台站仪器基础信息
Table 1 Site information of VP

台站	台基岩性	观测山洞情况					分辨率	采样率
		覆盖层厚度/m	室内气温年变幅/°C	室内气温日变幅/°C	相对湿度/%			
徐州台	寒武系中统厚层灰岩	50	18	<0.1	98	$1 \times 10^{-3}''$	1次/s	
常熟台	五通组石英砂岩	20~30	17	<0.1	100			

2 资料选取

基于中国地震局地球物理台网(站)观测数据跟踪分析,对徐州台和常熟台 VP 型宽频带倾斜仪 2017~2019 年准实时地震事件记录进行统计分析,共记录到 186 次地震(其中徐州台记录到 168 次;常熟台记录到 161 次,2 个台站同时记录到了 142 次地震),震中分布如图 1 所示,地震均为本区域小震或中远强震。

最大地震是 2017 年 9 月 8 日 12 时 49 分,墨西哥

沿岸近海(15.1°N,93.9°W)发生的 8.2 级地震。国内最大地震是 2017 年 8 月 8 日 21 时 19 分,四川阿坝州九寨沟县(33.2°N,103.8°E)发生的 7.0 级地震。

本文对 2 套 VP 型宽频带倾斜仪量取记录的同震响应 NS、EW 向最大响应振幅,对应震级和震中距按测项分类统计,并分别作振幅分布特征图,结果如图 2、3 所示。同震响应最大振幅幅值,徐州台 NS 向大于 EW 向的地震为 77 次,占记录总数的 45.8%;常熟台 NS 向大于 EW 向的地震为 58 次,占记录总数的 36%。NS 向最大振幅整体偏小,个别地震该测项未出现同震响应。

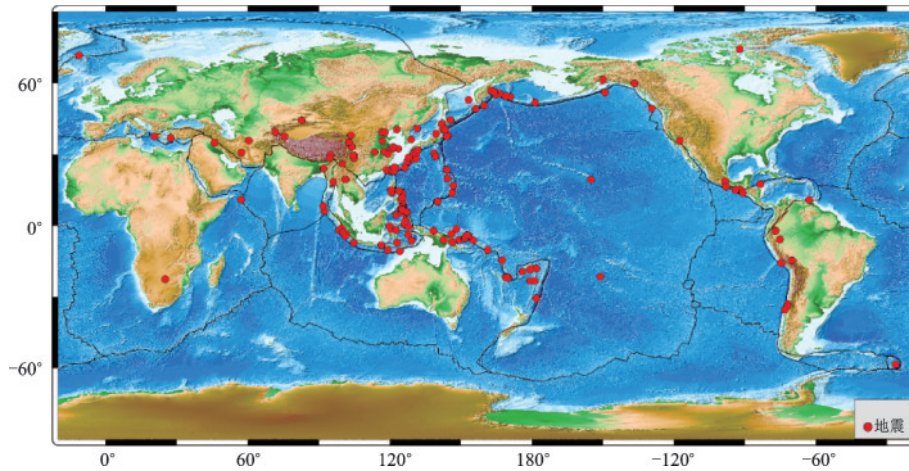


图 1 地震分布

Fig.1 Distribution of earthquakes

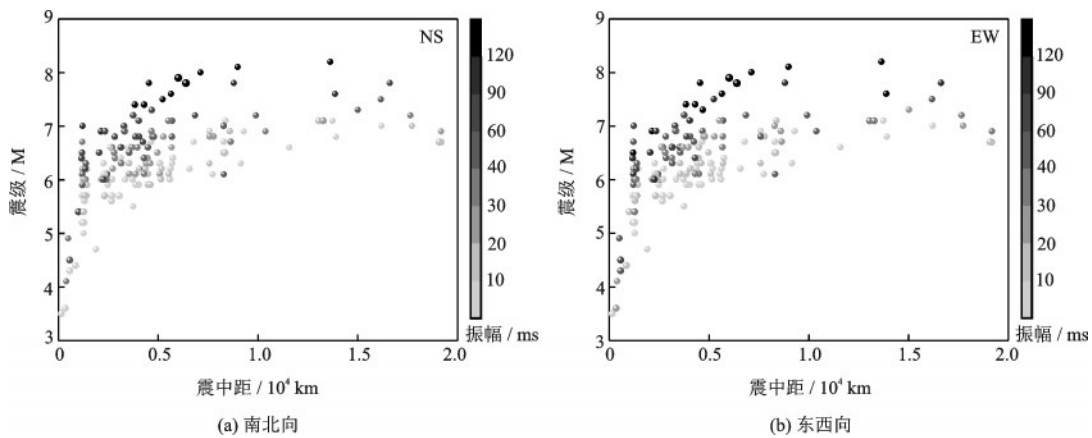


图 2 徐州台 VP 宽频带倾斜仪振幅分布特征

Fig.2 Amplitude characteristics of the VP-type broadband tiltmeter in the Xuzhou station

统计分析发现:(1)2 套 VP 型宽频带倾斜仪对 100 km 以内的 3 级地震、500 km 以内的 5 级地震、1 000 km 以内的 6 级地震及全球的 7、8 级地震都有响应,这与前人研究基本一致;(2)同震形变波的最大振幅幅值与震级成正相关,而随着震中距的增

加,幅值降低;(3)EW 向最大振幅幅值较 NS 向偏大,常熟台尤其显著;(4)对震级大于 6 级以上的强地震的记录,徐州台最大振幅幅值大于常熟台。

对 2017~2019 年江苏省及周边记录到的地震信息进行统计,同震响应参数见表 2。

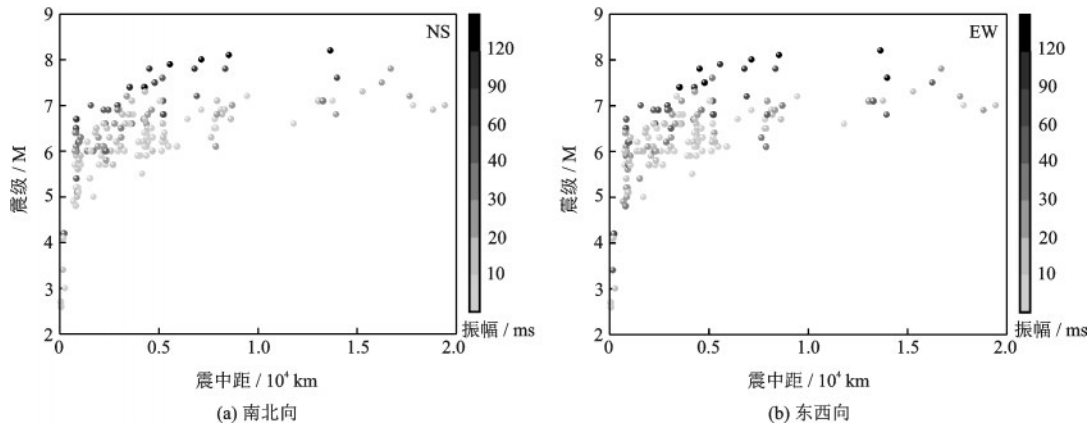


图3 常熟台VP宽频带倾斜仪振幅分布特征

Fig.3 Amplitude characteristics of the VP-type broadband tiltmeter in the Changshu station

表2 同震响应参数

Table 2 Parameters of co-seismic responses

地点	发震日期	纬度/(°)	经度/(°)	震级	震中距		最大响应幅值			
					徐州台	常熟台	徐州台		常熟台	
							NS	EW	NS	EW
江阴	2017-02-05	31.92	120.20	2.7	294	59	—	—	5.689	4.377
兖州	2017-09-10	35.60	116.80	3.5	156	568	6.32	1.782	—	—
永清	2018-02-12	39.37	116.65	4.3	574	931	7.38	44.15	—	—
无为	2018-04-06	31.10	117.50	3.6	342	312	—	23.23	—	—
黄海	2019-12-08	33.06	121.39	4.1	412	167	31.05	21.23	—	—
应城	2019-12-26	30.98	113.46	4.9	514	693	37.87	52.66	—	—

由表2可见,江阴M2.7地震距离常熟台和徐州台分别为59 km和381 km,常熟台记录到此次地震的同震响应均呈现阶升—振荡下降的动态特征,NS向阶升幅度约为5.689,EW向阶升幅度约为4.377;但徐州台没有观测到显著的同震阶变响应,可能因为该地震震级较小。由表2可以看出,对6个近震两套VP宽频带倾斜仪的响应存在一定差异,常熟台仅记录到2017年2月5日江苏无锡江阴市M2.7,对震中距离160 km黄海M4.1地震没有特别显著的同震响应,推断场台站的场地介质属性对场地响应存在一定的影响。

3 振幅—震级关系

同震形变波的最大振幅幅值主要反映的是地震面波,其特征就是随着震中距的增加,面波发生频散和衰减,其规律与震级和震中距有密切关系,还与传播路径和其力学性质、观测场地等有关^[13]。

从图2和图3可知同震形变波响应最大振幅幅值与震中距负相关,与震级正相关。考虑到震源和传播路径的复杂性,难以准确地对台站的同震形变进行评估,因此选择同一构造环境内的中强地震,认为其发震机制相似、地震传播路径大致相同,可以简化研究因素,假设这些地震的同震幅度只与震级大小有关,可进一步研究振幅—震级关系。

从图1可以看出,江苏省2套VP型宽频带倾斜仪记录到的地震事件空间上主要集中在环太平洋地震带,以中国台湾、日本岛弧和菲律宾群岛为主要发震区域。本文以环太平洋地震带西侧为重点研究区域,以构造环境为切入点,将主要地震分为2个研究区域,环太平洋地震带西北侧构造环境为板块俯冲,主要为中国台湾-日本岛弧地区;环太平洋地震带西南侧构造环境为板块挤压,主要为菲律宾-印度尼西亚地区。

徐州台与常熟台相距400 km左右,2套VP型宽频带倾斜仪不同的构造分区振幅-震级关系差别

很大,如图4所示。结果显示:(1)对于中国台湾-日本岛弧研究区域,常熟台的收敛程度明显小于徐州台,特别常熟台EW向收敛性较差, R^2 仅为0.087 1。(2)中国台湾-日本岛弧区域和菲律宾-印度尼西亚区域震中距分别在1 000~2 000 km和2 000~4 000 km,不同区域的拟合程度随着震中距的增大,拟合方差 R^2 显著提高;同区域内NS向拟合方差 R^2 明显高于EW向。(3)位于同一区域的地震,徐州台NS向和EW向拟合均较为稳定,随着震中距增大,NS向拟合方差 R^2 从0.489 2提高到0.681 1,EW向拟合方差 R^2 从0.363 5提高到0.610 3。(4)常熟台NS向相比于EW向拟合程度要稳定,随着震中距增大,EW向拟合方差 R^2 从0.087 1大幅提高到0.466 9,与NS向拟合方差 R^2 (0.470 8)基本持平,对于震中

距在2 000 km以内的地震,仪器记录到的面波信息更复杂。

4 仪器和场地特性

目前江苏省在运行的VP型宽频带倾斜仪仅徐州台和常熟台,两个台站仅相距400 km,从分区统计的地震同震响应结果来看,两个台站的对不同区域的地震波衰减存在较大的差异,这种差异可能与仪器基墩的稳定性、场地基岩性质等因素密切相关^[1]。本文结合观测数据分析计算仪器运行特征参数,并根据场地基岩性质认识场地环境,综合分析同震记录的影响因素。

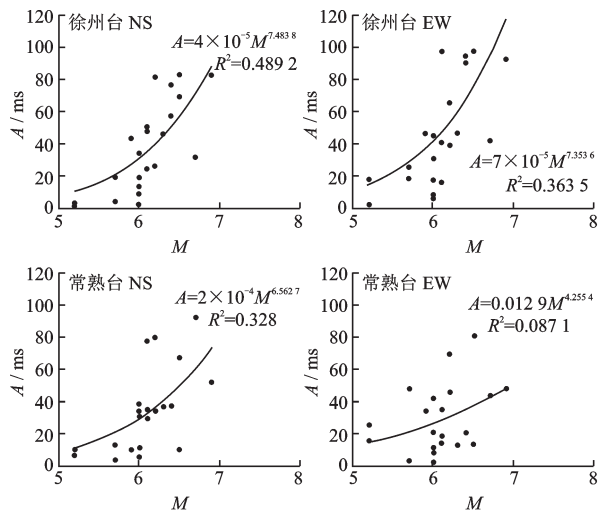
4.1 年零漂和相对噪声水平 M_1

年零漂是用来衡量观测仪器及其墩基稳定程度或地壳继承性新构造运动的,计算方法为剔除每年人为调零的连续数据的日均值,计算得到年零漂。相对噪声水平 M_1 是衡量观测资料长期稳定性的一项定量指标。应用契比雪夫多项式与一年度观测资料73个五日均值做30阶拟合而得,计算公式:

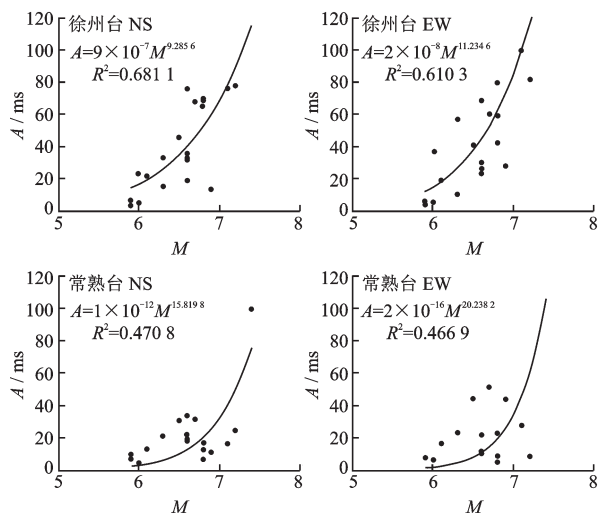
$$F(X) = \frac{1}{2} C_0 + \sum_{n=1}^m C_n T_n(X) \quad (1)$$

式中, $T_n(X) = \cos(n \arccos X)$ ($n = 0, 1, 2, \dots, m$)为契比雪夫多项式; C_n ($n = 0, 1, 2, \dots, m$)为不同周期的振动幅值。

本文对2017~2019年2套VP型宽频带倾斜仪的观测资料,计算年零漂、相对噪声水平 M_1 ,年零漂计算结果见表3。可见,徐州台2018年以后年零漂波动较小;相较于徐州台,常熟台存在一定幅度的漂移。相对噪声水平 M_1 计算结果为徐州台NS向为0.000 2~0.001 8,EW向为0.000 7~0.003 2;常熟台NS向为0.000 3~0.000 5,EW向为0.000 2~0.000 4,均符合优秀台站所要求的0.02''的指标。



(a) 中国台湾-日本岛弧地区



(b) 菲律宾-印度尼西亚地区

图4 振幅—震级关系

Fig.4 Relationship between amplitude and magnitude

表3 观测资料计算结果

Table 3 Calculation results of observations

年份	徐州台		常熟台	
	NS	EW	NS	EW
2017	-178.84	167.08	-219.44	-267.32
2018	-70.99	126.26	-475.30	-79.47
2019	-77.15	100.09	-187.26	-118.21

4.2 基岩力学性质

徐州台和常熟台为江苏省形变综合台站,台站不仅有VP型宽频带倾斜仪,还有钻孔体应变仪,根据钻孔资料进一步分析台站场地的岩石力学性质。由表1可见,徐州台台基岩性为寒武系中统厚层灰岩,常熟台台基岩性为五通组石英砂岩,将钻孔的岩芯加工为圆柱体试样后,在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室进行单轴压缩试验,测试出每个试件的单轴抗压强度,并根据试件的应力、应变值计算出每个试件的弹性模量。

岩石单轴抗压强度反映了岩石在单向受压作用下被破坏时所能承受的极限压应力值,即为试件应力—应变曲线上轴向应力的峰值。计算公式如下:

$$R = \frac{P}{A} \quad (2)$$

式中, R 为岩石单轴抗压强度(MPa); P 为破坏载荷(N); A 为试件截面积(mm²)。

岩石的变形特性也是从应力—应变曲线中获得,弹性模量是最常用的岩石材料的变形指标:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_a} \quad (3)$$

式中, E 为岩石弹性模量(GPa); σ 为应力应变曲线弹性段抗压强度; ϵ_a 为应力应变曲线弹性段纵向应变。

应力—应变曲线的弹性段内计算弹性模量,即应变曲线上一段比较平直的线段斜率就是弹性模量。

通过单轴压缩试验,获得台站岩样的力学参数,见表4。

由表4可知,徐州台试样单轴抗压强度92.18~108.78 MPa,平均单轴抗压强度103.7 MPa;弹性模量为15.3~24.7 GPa,平均弹性模量为20.1 GPa。

表4 台站岩样力学参数

Table 4 The mechanical parameters of rock samples

台站	试样	抗压强度 R/MPa	弹性模量 E/GPa
徐州台	1	108.78	23.1
	2	105.82	15.3
	3	92.18	24.7
	4	108.03	17.3
常熟台	5	346.54	80.8
	6	334.34	86.0
	7	292.30	84.1
	8	190.98	55.5

常熟台试样单轴抗压强度190.98~346.54 MPa,平均单轴抗压强度291.04 MPa;弹性模量为55.5~86 GPa,平均弹性模量为76.6 GPa。

从试验结果(表4)可知,徐州台的整体试件弹性模量比常熟台小,平均弹性模量徐州台仅为常熟台的三分之一,平均单轴抗压强度徐州台也仅为常熟台的三分之一。徐州台为灰岩,岩芯状况显示岩芯层状裂隙比较明显;常熟台为石英砂岩,岩芯状况显示岩芯节理致密,测试结果与台站基岩岩性特征相符。

5 结 论

(1)VP型宽频带倾斜仪提高了采样率,为秒采样,不仅能记录清晰的固体潮,还能记录到的同震形变波,针对不同区域的同震形变波的最大振幅幅值具有一定的规律性,最大振幅与震级间呈正相关,符合地震波衰减特性。

(2)不同的构造分区中2套VP型宽频带倾斜仪拟合的振幅—震级关系,随着震中距增大,最大振幅幅值呈指数上升,震中距超过2 000 km,拟合程度随之更高,说明远场的地震因为地震波传播距离的增大,震中距的路径长度规避了震源和震级的特殊性,在拟合关系中存在一定的稳定性。

(3)徐州台的NS向和EW向同震响应中最大振幅幅值相当,拟合均较为稳定,同一研究区域内的拟合方差 R^2 差异不大,随着震中距增大,拟合方差 R^2 显著提高;常熟台的NS向和EW向对2 000 km以内的地震拟合程度差异性较大,尤其是EW向拟合方差 R^2 偏小。相比与徐州台,常熟台的记震能力一般。

(4)根据仪器的运行情况,两个台站相对噪声水平 M_1 均符合优秀台站,徐州台年零漂比常熟台变化要小,说明徐州台站观测仪器和墩基稳定性要更优越。两个台站的岩性存在较大差异,从岩芯力学性质可以看出徐州台的弹性模量要小于常熟台,抵抗单位变形量所需的外力越小,变形量越显著,因此,对于中强地震的记录,徐州台最大振幅幅值大于常熟台。

实际上每个台站的同震响应包含的信息非常丰富,既是对地震波的记录,也是震源破裂、传播路径和场地环境的综合反映,结合仪器的观测质量和台站场地基岩性质分析同震响应差异性,对于更复杂的影响因素拟在今后的研究工作中深入开展。

参考文献:

- [1] 中国地震局监测预报司. 地形变测量[M]. 北京:地震出版社, 2008.
Monitoring and Forecasting Department of China Earthquake Administration. Ground deformation measurement[M]. Beijing: Seismological Press, 2008. (in Chinese)
- [2] 牛安福, 吉平, 高福旺, 等. 印尼强地震引起的同震形变波[J]. 地震, 2006(1): 131-137.
Niu A F, Ji P, Gao F W, et al. Co-seismic deformation waves caused by Indonesia earthquakes[J]. Earthquake, 2006(1): 131-137. (in Chinese)
- [3] 方燕勋, 卞根发, 惠若愚. 湖州台高采样率倾斜仪同震响应初析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(3): 628-633.
Fang Y X, Bian G F, Hui R Y. Preliminary analysis of coseismic response of tiltmeters with high sampling rate used at huzhou seismostation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 628-633. (in Chinese)
- [4] 高明智, 郝冉, 高力, 等. VP型宽频带垂直摆倾斜仪与SQ-70石英水平摆倾斜仪观测资料对比分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(2): 179-183.
Gao M Zh, Hao R, Gao L, et al. Comparative analysis of data from VP broadband vertical pendulum and SQ-70 type analog quartz horizontal pendulum tiltmeter in Xuzhou seismological station [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36(2): 179-183. (in Chinese)
- [5] 龚丽文, 陈丽娟, 刘琦, 等. 基于形变仪器同震形变波衰减规律的研究[J]. 震灾防御技术, 2018, 13(2): 399-409.
Gong L W, Chen L J, Liu Q, et al. Study on attenuation law of co-seismic deformation waves based on instruments[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018, 13(2): 399-409. (in Chinese)
- [6] 袁曲, 许裕之, 吕品姬, 等. 宜昌台三类地倾斜仪观测数据的对比研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(6): 1536-1544.
Yuan Q, Xu Y Zh, Lyu P J, et al. A comparative study of the observation data form three kinds of ground tiltmeter at Yichang station [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1536-1544. (in Chinese)
- [7] 张利兵, 刘仕锦, 阳光, 等. 姑咱台和乡城台VS型垂直摆倾斜仪对比分析[J]. 四川地震, 2013(4): 25-31.
Zhang L B, Liu Sh J, Yang G, et al. Comparison of the observation data of the model VS tilt meters with the vertical pendulum in both guzha and xiangchen seismic station [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2013 (4): 25-31. (in Chinese)
- [8] 钟天任, 严兴, 刘吉平, 等. 广东形变观测台网垂直摆倾斜仪同震响应特征[J]. 地震地磁观测与研究, 2016, 37(3): 96-101.
Zhong T R, Yan X, Liu J P, et al. Co-seismic response characteristics of vertical pendulum tiltmeters in Guangdong province [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2016, 37(3): 96-101. (in Chinese)
- [9] 郭伟, 陈立峰, 苏亚梅, 等. 鄂尔多斯块体北缘台站水管仪观测质量及同震响应对比分析[J]. 中国地震, 2019, 35(2): 359-366.
Guo W, Chen L F, Su Y M, et al. Comparison analysis of observation quality and co-seismic response of water tube tiltmeter in seismic stations on the north edge of the ordos massif [J]. Earthquake Research in China, 2019, 35(2): 359-366. (in Chinese)
- [10] 李正媛, 熊道慧, 刘高川, 等. 基于大数据挖掘的地震前兆台网观测数据跟踪分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2016, 37(3): 1-6.
Li Zh Y, Xiong D H, Liu G Ch, et al. The application of large data mining techniques in earthquake precursory network observation data tracking analysis [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2016, 37(3): 1-6. (in Chinese)
- [11] 王恒知, 周昱辰, 何斌, 等. 溧阳地区强震动台站场地特征研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(6): 1005-1009.
Wang H Zh, Zhou Y Ch, He B, et al. Study on site characteristics of strong motion in Liyang city [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(6): 1005-1009. (in Chinese)
- [12] 何斌, 田韬, 王恒知. 基于钻孔特性的体应变观测相关性研究[J]. 地震工程学报, 2018, 40(1): 153-158.
He B, Tian T, Wang H Zh. Study on correlation of volume strain observation based on borehole features [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 153-158. (in Chinese)
- [13] 公茂盛, 谢礼立, 章文波. 地震动输入能量衰减规律的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(3): 15-24.
Gong M Sh, Xie L L, Zhang W B. Attenuation of input energy of strong ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(3): 15-24. (in Chinese)
- [14] 刘春国, 李正媛, 吕品姬, 等. 数字化地震前兆台网观测数据质量评价方法[J]. 中国地震, 2017, 33(1): 112-121.
Liu Ch G, Li Zh Y, Lyu P J, et al. The quality evaluation method of the digital observation data form the earthquake precursory observation networks [J]. Earthquake Research in China, 2017, 33(1): 112-121. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)