

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230217001

基于地震动参数的烈度评定标准对比研究* ——以岷县-漳县6.6级地震为例

夏坤, 肖雪, 董林, 吴平川, 崔赞涛

(河北工程大学土木工程学院, 河北邯郸 056038)

摘要: 地震动参数是评定地震时地震烈度的参考依据,是烈度表的重要组成部分,尤其是在缺乏某些地震灾害判别现象的地区,地震动参数就成为非常有效的判别标准之一。对岷漳地震震区及周边获取的地震动记录进行处理和计算分析,得到水平向、三分向合成地震动参数和地震仪器烈度值;分别开展基于水平向地震动参数、三分向合成地震动参数和地震仪器烈度的烈度评定;探讨三种烈度评定方法对烈度评定结果的影响规律,从地震动参数定量参考指标角度验证现行地震烈度表与原有烈度表的一致性与差异性。结果表明:基于三分向合成地震动参数和地震仪器烈度的评定过程更为规范,结果更加具体和准确;基于三分向合成地震动参数和地震仪器烈度的烈度评定结果与实际宏观地震烈度符合良好,相差±1度以内的占比55%,相差±2度以内的占比91%,完全吻合率较之水平向地震动参数的烈度评定结果提高了18%。研究对于更加客观和科学地评定地震烈度具有重要意义和实用价值。

关键词: 地震烈度评定; 地震动参数; 仪器地震烈度; 宏观地震烈度; 岷漳地震

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0960-09

A Comparative Study on Seismic Intensity Evaluation Standards Based on Ground Motion Parameters: a Case Study of the Minxian-Zhangxian M_s 6.6 Earthquake

XIA Kun, XIAO Xue, DONG Lin, WU Pingchuan, CUI Zantao

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: With the accumulation of earthquake damage experience, the deepening understanding of earthquakes, and the development of seismic observation instruments, researchers have persistently pursued the continuous modification of intensity standards to make intensity evaluations more objective and scientific. Ground motion parameters serve as a reference basis for assessing the seismic intensity of an earthquake and are an important component of seismic intensity scales. They are particularly effective in regions lacking certain seismic disaster discrimination phenomena. This paper processed and analyzed ground motion records obtained from the Minxian-Zhangxian Earthquake region and its surroundings to obtain horizontal, three-component synthetic ground motion parameters and seismic instrument intensity values. They study conducted seismic intensity evaluations based on horizontal ground motion parameters, three-component synthetic ground motion parameters, and seismic instru-

* 收稿日期:2023-02-17;修回日期:2023-03-26

基金项目:国家自然科学基金(52278171)资助

作者简介:夏坤(1985—),女,副研究员,硕导,博士。主要从事防震减灾等方面的研究。E-mail: xiakunxiakun@163.com

ment intensity. It explored the influence of the three intensity evaluation methods on the results, verifying the consistency and differences between the current seismic intensity scale and the original intensity scale from the perspective of quantitative reference indicators of ground motion parameters. The results showed that: (1) The evaluation process based on three-component synthetic ground motion parameters and seismic instrument intensity was more standardized, with results being more specific and accurate. (2) The intensity evaluation results based on three-component synthetic ground motion parameters and seismic instrument intensity closely matched the actual macroseismic intensity, with 55% of the evaluations differing by ± 1 degree and 91% differing by ± 2 degrees. (3) The complete match rate improved by 18% compared to the intensity evaluation results based on horizontal ground motion parameters. This research holds significant importance and practical value for more objective and scientific seismic intensity evaluations.

Keywords: seismic intensity evaluation; ground motion parameter; instrumental seismic intensity; macroseismic intensity; Minxian-Zhangxian Earthquake

0 引言

地震发生后,合理评价各地区受影响的程度,是震后灾害评估、应急救援的重要信息,对其进行快速、准确的评定对于部署救灾、稳定社会、减少人员伤亡和经济损失起到重要作用^[1]。

地震烈度是地震引起的地面震动及其影响的强弱程度,是指地震时某一区域范围内的地表和各类建筑物遭受某一次地震影响的平均强弱程度。任一烈度值都是由多种标志在相互参证对比中得到的结果。评定烈度的标准不是一成不变的,随着建筑物形式和建造质量的变化、地震经验的积累,以及人们对地震认识的深化,需要不断地对其进行修改。随着地震观测仪器、信息通信技术、计算机技术等的发展,日本^[2]、美国^[3-4]以及中国台湾地区^[5-6]等都已经建立了应用实际地震动记录的仪器烈度速报系统,并确定了相应的仪器烈度标准。

我国自1957年第一部地震烈度标准发布以来,地震烈度表经历了4次大的修订,现行地震烈度表为《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020)^[7]。在1980年第一次修订工作中,刘恢先^[8]先生利用美国南加州地区的强震记录分析了地震烈度与地震动参数间的统计关系,并在烈度表中第一次列出了V度~X度时所对应的峰值加速度和峰值速度定量参考指标,在1999年和2008年两次修订中这个参考指标都没有进行过更改。

《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2008)^[9]自发布实施以来,在地震烈度评定中发挥了重要作用。在此期间,我国相继发生了汶川8.0级地震、玉

树7.1级地震、芦山7.0级地震、岷县-漳县6.6级地震和鲁甸6.5级地震等多次强烈地震,在实际烈度评定工作中,积累了大量震害资料和强震动观测记录,提供了新的烈度评定房屋类型和修订原烈度评定指标的依据。汶川特大地震造成了近8万人死亡和数千亿的经济损失,岷县-漳县6.6级地震造成近百人死亡和高达175.88亿的直接经济损失……诸如上述大震巨灾的惨痛教训,发展地震预警和地震烈度速报成为国家和社会急需的重要技术和亟待解决的重要问题^[10]。

在此背景下,随着我国地震观测台网布局的不断改善和台站数量的不断增多,利用地震观测仪器测量地震烈度已经得到广泛应用。鉴于此,2020年烈度表修订中引入仪器测定的地震烈度作为确定地震烈度的指标,修改了使用40年未曾修订的地震动参数定量参考指标,保持了与原有地震烈度表的继承性和一致性。

在没有仪器观测资料的情形下,地震烈度的评估一般基于震后现场宏观震害调查,并以地震动参数作为判定参考依据。特别是对缺乏某些地震灾害判别现象的地区,基于地震动参数的烈度评定就显得尤其重要。

具备仪器测定地震烈度条件的地区,宜采用仪器测定的地震烈度。根据仪器观测记录计算得到的地震烈度(或地震动强度),称为地震仪器烈度,其能反映地震的影响程度,可在震后根据地震动记录快速计算获取,且具有直观、简便等特点。地震仪器烈度等图件的快速产出在很大程度上可满足政府部门对地震信息的时效性需求,有效地缩短了地震应急响应所需的时间,对于指导震后的各项应

急救援工作以及灾害快速评估工作将起到重要的参考作用。对于我国来说,用仪器测定烈度是烈度历史上的一次革新,但其评定结果的准确程度、物理量的理解、参数的定量等问题,还有待于进一步研究和发展。

本文针对岷县-漳县6.6级地震强震动记录,开展基于水平向地震动参数、三分向合成地震动参数和地震仪器烈度的烈度评定,探讨三种烈度评定方法各自的优缺点以及对烈度评定结果的影响规律,对比烈度评定结果与实际宏观地震烈度的异同点,从地震仪器烈度及地震动参数定量参考指标角度验证现行地震烈度表与原有烈度表的继承性、一致性与差异性,研究对于更加客观和科学地评定地震烈度具有重要意义和实用价值。

1 岷县-漳县6.6级地震震害特征

2013年7月22日7时45分,甘肃省定西市岷县漳县交界(北纬34.540°,东经104.209°)发生 M_s 6.6级地震(简称“岷漳地震”),震源深度20 km,极震区烈度为Ⅷ度,Ⅵ度区及以上总面积为16 432 km²。地震共造成95人死亡,2 414人受伤,314 120人失去住所,直接经济损失达175.88亿人民币,属重大地震灾害事件,地震造成的人员伤亡及经济损失创本世纪国内中强地震之最^[11]。

与以往地震现场抽样调查不同,此次地震考察是第1次采取全覆盖方式进行,Ⅵ度区内的所有乡

镇均需要现场队全面覆盖,对每个调查的乡镇都采取重点调查的方法,获取了大量的现场调查资料^[12]。同时,此次地震是继2008年汶川地震和2013年芦山地震后,我国第三次比较全面地获得高质量数字强震动记录的地震^[13],填补了我国强震动记录稀少的空白,为研究基于地震动参数的烈度评定标准提供了必要的基础数据。

图1为岷漳地震烈度分布图^[14]。本次地震的烈度划分依照《中国地震烈度表》(GB/T 17742-2008)^[9](以下简称“《烈度表2008》”),通过灾区全覆盖详细调查方式,根据区内不同类型房屋震害、人的感觉、生命线工程震害、地面和山体破坏情况等,参照强震动记录而给出。

地震震中位于南北地震带北端的甘东南地区,该区是我国中强震多发区,历史和现今中强地震时有发生,特别是近年来在该地区发生了多次5级以上地震,如2003年岷县5.2级地震和2004年岷县-卓尼5.0级地震^[15]。此次地震震区地处山区(主要包括基岩山区和黄土覆盖山区),地形起伏明显,山坡陡峭,黄土覆盖较厚,震前降雨导致表层土体松弛,地震引发滑坡、崩塌、滚石等地质灾害,震害叠加效应显著;农村多数房屋抗震性能较差或不设防,部分民居建在河谷陡坡或山顶,地形放大效应明显,进一步加剧了破坏程度^[16]。

极震区总体沿临潭-宕昌断层方向分布,经过现场考察,没有发现地震造成的地表破裂^[17]。地震受灾范围涉及甘肃省13个县。灾区外围(Ⅵ度区以

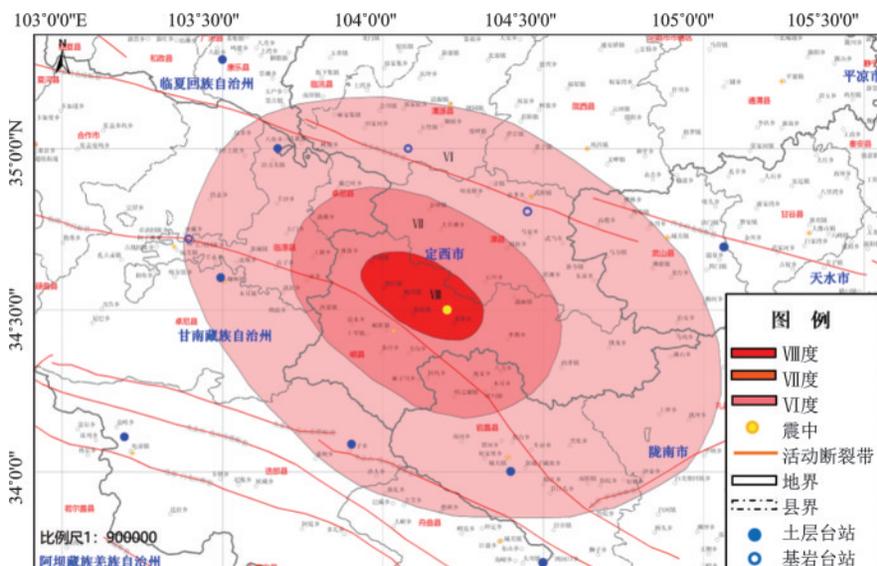


图1 岷县-漳县6.6级地震烈度分布及震区附近强震动记录台站分布

Fig.1 Distribution of seismic intensity and strong motion stations in the Minxian-Zhangxian M_s 6.6 Earthquake

外)部分县市也受到地震波影响,如白银市、定西市通渭县、天水市甘谷县、陇南市武都区、西和县和康县等地区,老旧民居、道路、水利设施等受到不同程度损坏^[11],因滚石崩塌或因惊吓避震不当造成少量人员伤亡^[12]。此次地震与同等级地震相比,具有震区面积广、震害重、损失大等特征。

2 地震动记录的选取与处理

岷漳地震发生后,川、陕、甘、宁四省(区)内共64个国家数字强震台被触发,如图1所示,震区及其周边范围(33°30'00"~35°30'00"N, 103°0'00"~105°30'00"E)共11个强震台被触发,并获取数据良好的

3分量(北南-NS、东西-EW、竖直-UD)自由场记录共33条。研究选取上述11个强震台记录的主震强震动进行研究。

对选取的地震动记录采用算术平均值方法(记录时间过程减去地震事件前记录,事前记录时间长度为10 s)进行基线校正处理,并对地震动加速度记录的每个分向均采用数字滤波器(最小相位滤波器,通带波纹小于0.5 dB,滤波器带外衰减为24 dB/oct)进行0.1~10 Hz带通滤波。

表1为强震动记录的基本情况并经基线校正、数字滤波处理后的峰值加速度。表中排序按台站经度自西向东编排,经度相同时按纬度自北向南编排。

表1 强震动记录的基本资料

Table 1 Basic information on strong motion records

序号	台站代码	台站名称	台站坐标		场地类型	仪器类型	震中距/km	峰值加速度/(cm·s ⁻²)			地震烈度
			纬度	经度				NS	EW	UD	
1	62DIB	迭部	34.099N	103.199E	土层	ETNA	105.0	12.609	14.805	10.572	V
2	62LTA	临潭	34.700N	103.400E	基岩	MR2002	76.2	7.162	5.780	4.863	VI
3	62BAS	八松	35.299N	103.500E	土层	MR2002	106.4	7.390	9.484	5.197	V
4	62ZNI	卓尼	34.599N	103.500E	土层	ETNA	65.3	3.311	3.076	1.017	VI
5	62YLG	冶力关	35.000N	103.699E	土层	ETNA	69.3	22.543	34.430	7.682	VI
6	62LZK	腊子口	34.099N	103.900E	土层	MR2002	56.7	34.850	44.778	13.968	VI
7	62WZZ	五竹镇	35.000N	104.099E	基岩	MR2002	52.2	16.550	8.785	6.972	VI
8	62ZHQ	舟曲	34.799N	104.400E	基岩	MR2002	33.7	12.600	11.528	10.037	VI
9	62TCH	宕昌	34.000N	104.400E	土层	ETNA	62.6	75.220	66.109	31.393	VI
10	62SHW	沙湾	33.700N	104.500E	土层	MR2002	97.3	7.804	4.865	3.808	V
11	62WST	武山台	34.700N	105.099E	土层	MR2002	83.5	18.553	17.519	13.254	V

3 基于地震动参数的烈度评定

3.1 基于水平向地震动参数的烈度评定

《烈度表2008》发布于2008年11月13日,并于2009年3月1日起开始实施。2013年岷漳6.6级地震的烈度评定便依据于此。

《烈度表2008》规定了地震烈度的评定指标,包括人的感觉、房屋震害程度、其他震害现象、水平向地震动参数。并提出当有自由场地强震动记录时,水平向地震动峰值加速度和峰值速度可作为综合评定地震烈度的参考指标。

《烈度表2008》给出了地震烈度V~Ⅹ度的水平向地震动参数烈度评定标准。这里结合岷漳地

震烈度分布VI~Ⅷ度的实际情况,节选地震烈度V~Ⅷ度的评定标准,列于表2。表中给出的峰值加速度、峰值速度是参考值,括弧内给出的是变动范围。

对选取的强震动记录经基线校正、数字滤波处理后得到校正后的地震动加速度记录,给出峰值加速度;再将地震动加速度记录经记录转换得到速度记录,给出峰值速度。表3给出了强震动记录的水平向峰值加速度和峰值速度。并依照表2烈度评定标准,给出基于水平向地震动参数的烈度评定结果,同列于表3。

(1)由于《烈度表2008》只给出地震烈度V~Ⅹ度的水平向地震动参数烈度评定标准,对于峰值加速度<0.22 m/s²、峰值速度<0.02 m/s的强震动记录未能做出具体地震烈度的判断,只给出烈度<Ⅹ度的评定结果。

表2 基于水平向地震动参数的烈度评定标准

Table 2 Evaluation standards of seismic intensity based on horizontal ground motion parameters

地震烈度	峰值加速度/(m·s ⁻²)	峰值速度/(m·s ⁻¹)
V	0.31(0.22~0.44)	0.03(0.02~0.04)
VI	0.63(0.45~0.89)	0.06(0.05~0.09)
VII	1.25(0.90~1.77)	0.13(0.10~0.18)
VIII	2.50(1.78~3.53)	0.25(0.19~0.35)

(2)《烈度表 2008》未给出强震动记录处理过程的具体规范要求,尤其是数字滤波处理过程,其滤波频率及滤波方法的不同均会对峰值加速度、峰值速度有较大影响,从而影响烈度的评定结果。

(3)《烈度表 2008》基于地震动参数评定烈度时只考虑了水平向地震动,未考虑竖向地震动的影响。但经研究发现^[18],大地震在近场及远场区域均常出现竖向地震动幅值与水平地震动相当或更大的现象,竖向地震动有时是造成结构破坏的主要原因之一。此次岷漳地震出现少量房屋由于较强竖向地震作用而产生破坏的现象。如岷县梅川乡茶固小学,砖混结构房屋,地基为较厚黄土覆盖,在极震区较强的竖向地震作用下,基础产生很强的竖向高频振动,并在建筑物产生了很强的竖向拉应力,由于黄土基础处理密实度不够且不够均匀,造成沉降差异,从而在基础底部形成横向裂缝^[15](图 2)。诸如此类的震害现象说明竖向地震动对岷漳地震震害的影响是不可忽略的。

(4)岷漳地震震区及周边地处山区,地震引发滑坡、崩塌、滚石等地质灾害,震害叠加效应显著;

农村多数房屋抗震性能较差或不设防,部分民居建在河谷陡坡或山顶,地形放大效应明显等。经研究发现^[15,19-20],场地条件对地震动的放大效应可使烈度增加 1~2 度。

(5)地区烈度是对较大范围一般土壤条件评定的平均烈度。场地烈度是根据局部场地地基土壤的好坏,对地区烈度所作的修正。在相同对比区域内,基岩场地的烈度值相较于土层场地普遍较低。如基岩台 62LTA、62WZZ 和 62ZHQ 地震记录评定烈度分别为 < V 度、V 度和 < V 度,但其实际均属于 VI 烈度区。

(6)综合考虑上述影响因素,对于岷漳地震基于水平向地震动参数的评定烈度结果与实际地震烈度相差 ±2 度为可接受,其中相差 ±1 度为准确,相差 ±2 度为合理。据此,判定基于水平向地震动参数的烈度评定结果可接受率达 100%,其中与实际地震烈度完全吻合的为 1 个(占比 9%),评定结果准确的为 7 个(占比 64%),评定结果合理的为 3 个(占比 27%)。



图 2 茶固小学砖混房屋墙体贯通裂缝^[15]

Fig.2 Perforative crack on the brick-and-concrete house at Chagu primary school^[15]

表3 水平向地震动参数及评定烈度

Table 3 Horizontal ground motion parameters and seismic intensity assessment

序号	台站代码	峰值加速度/(cm·s ⁻²)			峰值速度/(cm·s ⁻¹)			评定烈度	地震烈度	烈度差异	结果备注
		NS	EW	平均	NS	EW	平均				
1	62DIB	12.61	14.81	13.71	0.93	0.83	0.88	< V	V	1度	准确
2	62LTA	7.16	5.78	6.47	0.67	0.41	0.54	< V	VI	2度	合理
3	62BAS	7.39	9.48	8.44	1.06	0.99	1.02	< V	V	1度	准确
4	62ZNI	3.31	3.08	3.19	0.08	0.06	0.07	< V	VI	2度	合理
5	62YLG	22.54	34.43	28.49	1.07	1.65	1.36	V	VI	1度	准确
6	62LZK	34.85	44.78	39.81	1.24	2.68	1.96	V	VI	1度	准确
7	62WZZ	16.55	8.79	12.67	1.74	1.83	1.78	V	VI	1度	准确
8	62ZHQ	12.60	11.53	12.06	0.90	0.86	0.88	< V	VI	2度	合理
9	62TCH	75.22	66.11	70.66	2.78	3.91	3.34	VI	VI	0度	吻合
10	62SHW	7.80	4.87	6.33	0.62	0.56	0.59	< V	V	1度	准确
11	62WST	18.55	17.52	18.04	0.92	0.89	0.91	< V	V	1度	准确

3.2 基于三分向合成地震动参数的烈度评定

《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020)^[6](以下简称“《烈度表 2020》”)发布于 2020 年 7 月 21 日,并于 2021 年 2 月 1 日起开始实施。该烈度表以附录形式给出了地震动记录选取、基线校正、记录转换、数字滤波、记录合成、计算合成 *PGA* 和 *PGV* 等的具体规范性条文。

选取的地震动记录所用观测仪器见表 1,其主要技术指标见表 4,满足低频截止频率不大于 0.1 Hz、高频截止频率不小于 10 Hz 的规范要求。依照规范条文,采用算术平均值方法对选取的地震动记录进行基线校正,将地震动加速度记录转换得到速度记录,采用数字滤波器进行 0.1~10 Hz 带通滤波。

表 4 数字强震仪主要技术指标

Table 4 Main technical indexes of digital accelerograph

序号	仪器类型	通道数/个	动态范围/dB	最大记录范围/g	频率范围/Hz	数据存储空间/MB
1	MR2002	3	108	±1	0~200	32
2	ETNA	3	108	±1	0~200	64

3.2.1 地震动记录的合成

采用公式(1)计算三分向合成加速度记录,采用公式(2)计算三分向合成速度记录。

$$a(t_i) = \sqrt{a^2(t_i)_{E-W} + a^2(t_i)_{N-S} + a^2(t_i)_{U-D}} \quad (1)$$

$$v(t_i) = \sqrt{v^2(t_i)_{E-W} + v^2(t_i)_{N-S} + v^2(t_i)_{U-D}} \quad (2)$$

式中, $a(t_i)$ 为 t_i 时刻点合成加速度值; $v(t_i)$ 为 t_i 时刻点合成速度记录; $a(t_i)_{E-W}$ 为 t_i 时刻点滤波后东西方向加速度值; $a(t_i)_{N-S}$ 为 t_i 时刻点滤波后北南方向加速度值; $a(t_i)_{U-D}$ 为 t_i 时刻点滤波后垂直方向加速度值; $v(t_i)_{E-W}$ 为 t_i 时刻点滤波后东西方向速度值; $v(t_i)_{N-S}$ 为 t_i 时刻点滤波后北南方向速度值; $v(t_i)_{U-D}$ 为 t_i 时刻点滤波后垂直方向速度值。

3.2.2 三分向合成地震动参数

采用公式(3)计算合成地震动加速度记录的最大值(以下简称“合成 *PGA*”),采用公式(4)计算合成地震动速度记录的最大值(以下简称“合成 *PGV*”)。三分向合成地震动参数结果见表 5。

$$PGA = \max[a(t_i)] \quad (3)$$

$$PGV = \max[v(t_i)] \quad (4)$$

表 5 三分向合成地震动参数及评定烈度

Table 5 Three-component synthetic ground motion parameters and seismic intensity assessment

序号	台站代码	合成 <i>PGA</i> / (cm·s ⁻²)	合成 <i>PGV</i> / (cm·s ⁻¹)	评定烈度	地震烈度	烈度差异	备注
1	62DIB	16.78	0.99	IV	V	1度	准确
2	62LTA	7.55	0.78	III	VI	3度	合理
3	62BAS	9.75	1.07	IV	V	1度	准确
4	62ZNI	3.66	0.08	II	VI	4度	偏差
5	62YLG	35.44	1.68	V	VI	1度	准确
6	62LZK	47.88	2.88	VI	VI	0度	吻合
7	62WZZ	18.03	1.93	V	VI	1度	准确
8	62ZHQ	15.56	1.43	IV	VI	2度	合理
9	62TCH	85.31	4.52	VI	VI	0度	吻合
10	62SHW	8.82	0.88	IV	V	1度	准确
11	62WST	26.28	1.13	V	V	0度	吻合

3.2.3 基于三分向合成地震动参数的烈度评定结果

《烈度表 2020》给出了地震烈度 I~Ⅲ 度的三分向合成地震动参数烈度评定标准。这里结合岷漳地震烈度分布实际情况及合成 *PGA*、*PGV*,节选地震烈度 II~VI 度的评定标准,列于表 6。

依照表 6 烈度评定标准,给出基于三分向合成地震动参数的烈度评定结果,列于表 5。

(1)对比于《烈度表 2008》只能给出烈度 < V 度的评定结果而言,由于《烈度表 2020》给出了地震烈

表 6 基于三分向合成地震动参数的烈度评定标准

Table 6 Evaluation standards of seismic intensity based on three-component synthetic ground motion parameters

地震烈度	合成 <i>PGA</i> / (m·s ⁻²)	合成 <i>PGV</i> / (m·s ⁻¹)
II	3.69 × 10 ⁻² (2.58 × 10 ⁻² ~ 5.28 × 10 ⁻²)	2.59 × 10 ⁻³ (1.78 × 10 ⁻³ ~ 3.81 × 10 ⁻³)
III	7.57 × 10 ⁻² (5.29 × 10 ⁻² ~ 1.08 × 10 ⁻¹)	5.58 × 10 ⁻³ (3.82 × 10 ⁻³ ~ 8.19 × 10 ⁻³)
IV	1.55 × 10 ⁻¹ (1.09 × 10 ⁻¹ ~ 2.22 × 10 ⁻¹)	1.20 × 10 ⁻² (8.20 × 10 ⁻³ ~ 1.76 × 10 ⁻²)
V	3.19 × 10 ⁻¹ (2.23 × 10 ⁻¹ ~ 4.56 × 10 ⁻¹)	2.59 × 10 ⁻² (1.77 × 10 ⁻² ~ 3.80 × 10 ⁻²)
VI	6.53 × 10 ⁻¹ (4.57 × 10 ⁻¹ ~ 9.36 × 10 ⁻¹)	5.57 × 10 ⁻² (3.81 × 10 ⁻² ~ 8.17 × 10 ⁻²)

注:表中给出的合成 *PGA*、合成 *PGV* 是参考值,括号内为变化范围。

度 I~Ⅲ度的三分向合成地震动参数烈度评定标准,其评定结果具体而明确。

(2)《烈度表 2020》给出了地震动记录选取、基线校正、记录转换、数字滤波、记录合成、计算合成 PGA 和 PGV 等具体规范性条文。避免了因采用不同滤波频率及滤波方法等对地震动参数的影响,从而使烈度评定过程更为规范,评定结果更为统一和准确。

(3)基于三分向合成地震动参数的烈度评定,考虑了竖直向地震动的影响,避免了因忽略竖直向地震动而造成烈度评定结果的偏差。

(4)考虑岷漳地震地质灾害等震害叠加效应显著,房屋抗震性能较差,地形放大效应明显等对实际震害的加重现实。对于评定烈度与实际地震烈度相差±2度的结果为可接受的。

(5)由于地震烈度受场地条件的影响,在相同对比区域内基岩地基上的烈度普遍较低,软弱地基上的地震烈度会高于基岩地基上的烈度值。因此,基岩台 62WZZ 地震记录评定烈度值低于烈度区 1 度,认为其评定烈度结果即为准确。基岩台 62ZHQ 地震记录评定烈度值低于烈度区 2 度,认为其评定烈度结果即为合理。基岩台 62LTA 地震记录评定烈度为Ⅲ度,但其实际属于Ⅵ烈度区,基岩台 62LTA 地震记录评定烈度值明显低于相同区域的土层台,评定烈度低于烈度区 3 度以内,该台站且处于Ⅴ度区和Ⅵ度区分界线边缘,认为其评定烈度结果即为合理。

(6)土层台 62ZNI 地震记录评定烈度为Ⅱ度,但其实际属于Ⅵ烈度区,评定烈度低于实际烈度 4 度。除考虑到震害放大效应外,经分析发现,该台站记录的竖直向峰值加速度非常小,仅 1.02 cm/s^2 ,使得三向合成后评定参数较小。可见,三分向合成地震动参数的烈度评定对于竖直向地震动衰减较快,对于竖直向峰值加速度较小的记录而言,仍存在不足之处。

(7)综合考虑上述影响,判定基于三分向合成地震动参数的烈度评定结果可接受率达 91%,其中与实际地震烈度完全吻合的为 3 个(占比 27%),较水平向地震动参数的烈度评定结果吻合率提高了 18%;评定结果准确或合理的为 7 个(占比 64%);评定结果略有偏差的为 1 个(占比 9%)。

3.3 仪器测定的地震烈度

3.3.1 仪器烈度计算方法

《烈度表 2020》引入仪器测定的地震烈度作为确定地震烈度的指标,增加规范性附录地震烈度的仪器测定方法。仪器烈度的计算流程如图 3 所示。

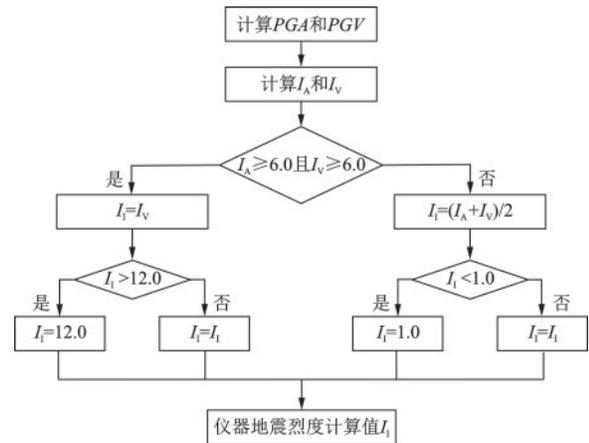


图 3 仪器烈度的计算流程

Fig.3 Calculation process of instrumental seismic intensity

采用公式(5)计算 I_A (应用合成 PGA 得到的地震烈度计算值),采用公式(6)计算 I_V (应用合成 PGV 得到的地震烈度计算值)。

$$I_A = 3.17 \log_{10}(PGA) + 6.59 \quad (5)$$

$$I_V = 3.00 \log_{10}(PGV) + 9.77 \quad (6)$$

按公式(7)计算仪器测定的地震烈度 I_I ,结果可取小数点后一位有效数字。如 I_I 小于 1.0,取 1.0;如 I_I 大于 12,取 12.0。

$$I_I = \begin{cases} I_V & I_A \geq 6.0 \text{ 且 } I_V \geq 6.0 \\ (I_A + I_V) / 2 & I_A < 6.0 \text{ 或 } I_V < 6.0 \end{cases} \quad (7)$$

3.3.2 仪器烈度计算结果分析

依照仪器烈度计算方法,计算并给出仪器烈度的烈度评定结果,列于表 7。

(1)仪器烈度计算过程(公式(5)、(6))中的 PGA 和 PGV 为经公式(3)、(4)得到的三分向合成地震动参数。因而,延续了基于三分向合成地震动参数评定烈度的优点,即地震动记录选取和处理过程规范,评定考虑了竖直向地震动的影响。

(2)仪器烈度的结果可取小数点后一位有效数字,提高了评定烈度的结果精度。仪器烈度经四舍五入后取整数,并与三分向合成地震动参数烈度评定结果对比,发现 45% 的仪器烈度比合成参数评定结果略小,会出现小于 1 度的现象。

表7 仪器烈度评定结果

Table 7 Assessment results of instrumental seismic intensity

序号	台站代码	I_A	I_V	I_1	地震烈度	烈度差异	备注
1	62DIB	4.13	3.76	3.9(4)	V	<1度	准确
2	62LTA	3.03	3.45	3.2(3)	VI	<3度	合理
3	62BAS	3.39	3.86	3.6(4)	V	<1度	准确
4	62ZNI	2.04	0.48	1.3(1)	VI	<5度	偏差
5	62YLG	5.16	4.45	4.8(5)	VI	<1度	准确
6	62LZK	5.58	5.15	5.4(5)	VI	<1度	吻合
7	62WZZ	4.23	4.63	4.4(4)	VI	<2度	准确
8	62ZHQ	4.03	4.24	4.1(4)	VI	<2度	准确
9	62TCH	6.37	5.74	6.1(6)	VI	0度	吻合
10	62SHW	3.25	3.60	3.4(3)	V	<2度	准确
11	62WST	4.75	3.93	4.3(4)	V	<1度	吻合

注:仪器烈度的结果取小数点后一位有效数字,括号内为仪器烈度经四舍五入后取整数烈度值。

(3)选取的地震记录为岷漳地震主震强震记录,而宏观调查烈度是主震和余震叠加的复合烈度,因此区域内仪器烈度小于宏观烈度是普遍存在的。

(4)考虑岷漳地震震区黄土及山体对震害的双重放大效应,仪器烈度评定结果与实际地震烈度相差 ± 2 度是可接受的。

(5)由于场地条件的影响,基岩台62WZZ和62ZHQ仪器烈度值低于烈度区2度以内,认为其仪器烈度结果即为准确。基岩台62LTA仪器烈度值明显低于相同区域的土层台,仪器烈度低于烈度区3度以内,认为其仪器烈度结果即为合理。

(6)土层台62ZNI仪器烈度低于实际烈度<5度。除宏观调查烈度是主震和余震叠加的复合烈度、震害放大效应等因素的影响外,该台站记录的竖直向峰值加速度仅为 1.02 cm/s^2 ,影响了三向合成后评定参数的大小,从而影响了仪器烈度的评定结果。

(7)综合分析判定,仪器烈度评定结果可接受率达91%,其中与实际地震烈度完全吻合的为3个(占比27%),评定结果准确或合理的为7个(占比64%);评定结果略有偏差的为1个(占比9%)。仪器烈度综合评定结果均与三分向合成地震动参数的烈度评定结果相同。

4 结论

针对岷漳地震开展基于水平向地震动参数、三

分向合成地震动参数和仪器测定的地震烈度的烈度评定,将烈度评定结果与实际宏观地震烈度进行对比分析,得到以下结论:

(1)《烈度表2008》只给出了地震烈度V~X度的水平向地震动参数烈度评定标准,对于岷漳地震峰值加速度 $<0.22 \text{ m/s}^2$ 、峰值速度 $<0.02 \text{ m/s}$ 的强震动记录未能做出具体地震烈度的判断,只能给出烈度<V度的评定结果。《烈度表2020》给出了地震烈度I~Ⅻ度的三分向合成地震动参数和仪器烈度的烈度评定标准,使得评定结果更为具体而明确。

(2)《烈度表2020》给出了地震记录选取、处理、合成与计算等具体规范性条文,且烈度评定过程考虑了竖直向地震动的影响。与《烈度表2008》相比,避免了因地震动记录选取不当、处理方式不同对地震动参数的影响,或因忽略竖直向地震动而造成烈度评定结果的偏差等,从而使烈度评定过程更为规范,评定结果更为统一和准确。

(3)依据《烈度表2020》开展基于三分向合成地震动参数和仪器烈度的烈度评定,两者综合评定结果相同。其烈度评定结果与实际地震烈度完全吻合率,较之《烈度表2008》基于水平向地震动参数的烈度评定结果提高了18%。

(4)宏观地震烈度是主震和余震叠加的复合烈度,是多因素、多指标、综合性的结果,是一定区域内地震影响的平均及延伸。而基于地震动参数的烈度评定结果及仪器烈度则是依据主震强震数据,强震数据只是个别点上的数据,不能忽略两者之间的差异性。对于岷漳地震仪器烈度值与宏观实际地震烈度相差 ± 1 度以内的占比55%,相差 ± 2 度以内的占比90%,仪器地震烈度评定结果与实际宏观烈度调查结果符合良好,具有较高的准确率,地震仪器烈度一定程度上可以客观反映强震台站周边的震害程度,可快速为应急救援决策提供依据。

参考文献:

- [1] 徐钦,田秀丰,王维欢,等.2013年甘肃岷县—漳县6.6级地震仪器烈度与宏观调查烈度比较分析[J].地震工程学报,2018,40(1):124-129.
- Xu Q, Tian X F, Wang W H, et al. A comparison and analysis of instrumental intensity and macroseismic survey intensity of the 2013 Minxian—Zhangxian $M_6.6$ earthquake in Gansu Province [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 124-129. (in Chinese)

- [2] 李裕澈.全日本实现仪器测定地震烈度[J].国际地震动态,2000,(9):32-35.
Li Y C. Instrumental determination of earthquake intensity in Japan [J]. Progress in Earthquake Sciences, 2000, (9): 32-35. (in Chinese)
- [3] Wald D J, Quitoriano V, Heaton T H., et al. TriNet “Shake-Maps”: Rapid generation of peak ground motion and intensity maps for earthquakes in southern California[J]. Earthquake Spectra, 1999, 15(3): 537-555.
- [4] Tselentis G A, Danciu L. Empirical relationships between modified Mercalli intensity and engineering ground motion parameters in Greece[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(4): 1863-1875.
- [5] Liu K S, Shin T, Tsai Y. A free field strong motion network in Taiwan: TSMIP [J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 1999, 10(2): 377-396.
- [6] Wu Y M, Teng T L, Shin T C, et al. Relationship between peak ground acceleration, peak ground velocity, and intensity in Taiwan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(1): 386-396.
- [7] 中国地震烈度表:GB/T 17742-2020[S].北京:中国标准出版社.2020.
- [8] 刘恢先.关于地震烈度及其工程应用问题[J].地球物理学报, 1978, 21(4): 340-351.
Liu H X. On the concept and application of earthquake intensity [J]. Acta Geophysica Sinica, 1978, 21(4): 340-351. (in Chinese)
- [9] 中国地震烈度表:GB/T 17742-2008 [S].北京:中国标准出版社.2008.
- [10] 金星,张红才,李军,等.地震仪器烈度标准初步研究[J].地球物理学进展,2013,28(5):2336-2351.
Jin X, Zhang H C, Li J, et al. Preliminary study on instrumental seismic intensity standard [J]. Progress in Geophys, 2013, 28(5): 2336-2351. (in Chinese)
- [11] 王晓刚,焦振武,陈永明.甘肃岷县-漳县 $M_s6.6$ 地震震害特征及减灾建议[J].甘肃科技,2016,32(6):31-36,70.
Wang X G, Jiao Z W, Chen Y M. Earthquake damage characteristics of the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake and disaster mitigation recommendations [J]. Gansu Science and Technology, 2016, 32(6): 31-36, 70. (in Chinese)
- [12] 李志强,姜立新,李亦纲,等.2013年7月22日甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震震害特点分析[J].地震地质,2013,35(3):593-603.
Li Z Q, Jiang L X, Li Y G, et al. Analysis on the characteristics of the $M_s6.6$ Minxian-Zhangxian earthquake hazard in Gansu Province, China on July 22, 2013[J]. Seismology and Geology, 2013, 35(3): 593-603. (in Chinese)
- [13] 温睿智.我国强地震动记录特征综述[J].地震学报, 2016,38(4):550-563.
Wen R Z. A review on the characteristics of Chinese strong ground motion recordings[J]. Acta Seismologica Sinica, 2016, 38(4): 550-563. (in Chinese)
- [14] 中国地震局.甘肃岷县漳县6.6级地震烈度图[EB/OL]. (2013-7-24) [2013-7-24]. <https://www.cea.gov.cn/cea/dzpd/dzdt/3571682/3571683/3575764/index.html>.
- [15] 王兰民,吴志坚.岷县漳县6.6级地震震害特征及其启示[J].地震工程学报,2013,35(3):401-412.
Wang L M, Wu Z J. Earthquake damage characteristics of the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake and its lessons[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 401-412. (in Chinese)
- [16] 石玉成,高晓明,谭明,等.2013年岷县漳县6.6级地震灾害损失评估[J].地震工程学报,2013,35(4):717-723.
Shi Y C, Gao X M, Tan M, et al. Disaster loss assessment of the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake, 2013 [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(4): 717-723. (in Chinese)
- [17] 陈正位,土登次仁,闫小兵.2013年甘肃岷县-漳县6.6级地震烈度异常点分布及成因[J].中国地震,2015,31(2):338-343.
Chen Z W, Tudeng C R, Yan X B. Abnormal earthquake intensity points and its mechanism of the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake on July 22, 2013, Gansu [J]. Earthquake Research in China, 2015, 31(2): 338-343. (in Chinese)
- [18] 夏坤,张令心,董林.汶川地震黄土地区远场地震动特征分析[J].防灾减灾工程学报,2018,38(1):178-184.
Xia K, Zhang L X, Dong L. Far-field ground motion characteristics of loess area in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(1): 178-184. (in Chinese)
- [19] 高玉峰,代登辉,张宁.河谷地形地震放大效应研究进展与展望[J].防灾减灾工程学报,2021,41(4):734-752.
Gao Y F, Dai D H, Zhang N. Progress and prospect of topographic amplification effects of seismic wave in canyon sites[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4): 734-752. (in Chinese)
- [20] 刘薛宁,陈国兴,任炜.深厚第四纪沉积土非线性性能对地表地震动特性的影响[J].防灾减灾工程学报, 2020,40(4):498-508.
Liu X N, Chen G X, Ren W. Influence of nonlinear behavior of quaternary deep sediment layers on the characteristics of surface ground motions[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(4): 498-508. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)