

李孝波, 薄景山, 李平, 王振宇, 赵培培. 2013. 地震烈度异常研究的若干进展. 地震学报, 35(3): 430-440.
Li Xiaobo, Bo Jingshan, Li Ping, Wang Zhenyu, Zhao Peipei. 2013. Some progress of study on abnormality of seismic intensity. *Acta Seismologica Sinica*, 35(3): 430-440.

地震烈度异常研究的若干进展*

李孝波^{1),*} 薄景山^{2),1)} 李平^{2),1)} 王振宇^{2),1)} 赵培培^{2),1)}

1) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所
2) 中国河北三河 065201 防灾科技学院

摘要 首先总结了地震烈度及其异常的特点;其次在分析多个烈度异常区震害资料的基础上,从地形条件、土层特性、断层、土层结构及地下水位等五方面详细分析和总结了烈度异常的形成原因和分布规律;最后从宏观考察、现场测试,强震记录分析,以及数值模拟三方面对烈度异常的研究进展进行了系统总结.总的来说,现阶段对烈度异常现象的研究还不全面,大多是基于宏观震害资料、区域地质构造及局部场地条件等方面的研究,研究成果不能全面充分地解释烈度异常的原因,且对异常现象的定性分析较多,缺少一定的定量分析,特别是缺乏基于强震记录的定量分析.文中对进一步研究烈度异常的形成原因、分布规律及震害影响提出了建议,对下一步开展地震烈度异常方面的研究工作具有重要的参考价值.

关键词 地震 烈度异常 形成原因 研究进展

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.03.014 中图分类号: P315.9 文献标志码: A

Some progress of study on abnormality of seismic intensity

Li Xiaobo^{1),*} Bo Jingshan^{2),1)} Li Ping^{2),1)} Wang Zhenyu^{2),1)} Zhao Peipei^{2),1)}

1) Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China
2) Institute of Disaster Prevention, Sanhe City, Hebei Province 065201, China

Abstract: This paper firstly summarized the characteristics of seismic intensity and its abnormality. Then, based on the analysis on the damage information of several intensity abnormal regions, the paper made a detailed summary of the abnormal intensity's formation mechanism and distribution rule associated with terrain feature, soil characteristics, faults, soil structure and underground water level. Finally, the paper made a systematical summary on the abnormal intensity research progress from macro-inspection, field testing, seismic record analysis and numerical simulation. In general, at present stage the research on intensity anomaly has not been comprehensive, mostly based on macroscopic seismic damage data, regional geological structure and local site conditions. The research results can not fully explain the causes of abnormal intensity, being mostly qualitative, instead of quantitative, analysis, especially lacking of strong

* 基金项目 国家自然科学基金(50978237)、中央高校基本科研业务专项资金(ZY20110102)和地震行业科研专项(201008006)共同资助.

收稿日期 2012-03-08 收到初稿, 2012-06-01 决定采用修改稿.

* 通讯作者 e-mail: xiaobolliem@sina.cn

motion record analysis. This paper has put forward a proposal to develop further research on the abnormal intensity's formation mechanism, distribution law and damage effect.

Key words: earthquake; abnormal seismic intensity; formation mechanism; research progress

引言

地震烈度评定是破坏性地震震害调查的重要内容之一，在震害调查中人们通常会发现地震烈度异常的现象。例如，2008年的汶川特大地震，在距震中约200 km的汉源老县城Ⅵ度区内出现了一个Ⅷ度高烈度异常区，不仅使汉源老县城遭受了严重破坏，还给人民的生命财产造成了巨大损失。然而，1976年的唐山大地震，在震中西北约50 km处的玉田县，则是Ⅶ度区内的Ⅵ度低烈度异常区，且该地区在1679年的三河—平谷地震中也表现为低烈度异常。烈度异常现象是地震波传播、场地条件及建(构)筑物对地震动影响的综合反映，因此无论是高烈度异常区还是低烈度异常区，研究其分布规律、形成原因及震害影响都具有重要的科学价值和工程意义。

自1966年邢台地震发现地震烈度异常区以来，烈度异常现象在后来的历次破坏性地震震害调查中都引起了国内专家与学者的重视，他们根据宏观震害调查资料、区域地质构造背景及强震记录资料对此进行了大量的、较为详细的研究工作(姚振兴等, 1974; 田启文等, 1981; 刘曾武等, 1984; 俞维贤等, 1994; 韩新民, 周瑞琦, 1997; 刁桂苓, 李钦祖, 2006; 高孟潭等, 2008; 薄景山等, 2009)。烈度异常产生的原因比较复杂，目前一般认为场地条件是产生烈度异常的主要原因。本文对烈度异常现象的研究现状进行了系统的回顾和总结，这对进一步研究烈度异常的分布规律、形成原因及震害影响具有重要的参考价值。

1 地震烈度特点

地震烈度是指某一地区的地面和各种人工建筑物遭受一次地震影响的强弱程度，与地震地面运动在时、空、强方面的分布和延展密切相关(胡聿贤, 2006)。在地震工程领域，它常被理解为地震震害的强弱程度或由震害强弱程度来反映地震动的大小。地震烈度的评定指标，通常包括人的感觉、房屋震害程度、水平向地震动参数及物体的反应等震害现象(胡聿贤, 2006; 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2008)。

地震烈度概念的使用早于地震动各物理量和震级。其最早记录可追溯到1564年欧洲的加斯塔尔第(Gastaldi)，他在讨论1564年意大利阿尔卑斯山地震的影响时，在地图上用不同的颜色来表示地震影响和破坏不同的地区，这就是烈度评定或烈度表编制的雏形(胡聿贤, 2006; 张敏政, 2010)。到了19世纪，世界各国共提出过50多种不同形式的地震烈度表。其中，在国外使用较广泛且具有代表性的是MM烈度表、MSK烈度表和JMA烈度表。我国第一个地震烈度表是谢毓寿(1957)编制的《新的中国地震烈度表》。该烈度表沿用了20多年，在整理历史地震资料、评定地震烈度、总结震害经验和结构抗震设计中起到了很大的作用。刘恢先通过总结邢台、通海、海城、唐山等地震的烈度评定经验，于1980年

修订编制了《中国地震烈度表》。该烈度表简化了烈度评定标准的描述,便于记忆和使用,并引入震害指数、地震峰值加速度和峰值速度作为评定烈度的参考量化指标(国家地震局震害防御司,1990)。此后,中国地震烈度表又进行了多次修编,目前使用的是孙景江等修订编制的2008版《中国地震烈度表》。该表除了保持与原有烈度表的一致性和继承性外,还充分利用了大量已有的震害资料和地震烈度评定经验,借鉴参考了国外地震烈度表,利用了汶川地震的部分震害资料,增加了评定地震烈度的房屋类型,修改了在地震现场不便操作或不常出现的评定指标(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2008)。

地震烈度作为度量地震破坏作用大小的尺度,具有震害大小和地震动强弱的双重内涵,同时还具有模糊性、综合性、平均性、主观性以及用破坏后果间接表示破坏作用的特点。虽然其在概念、评定以及使用上,还存在着一些问题,但在当前抗震设计中仍然被广泛使用。

2 烈度异常区

在地震烈度等值线图中,经常会有一些零星分布的“孤岛”,其烈度值高于或低于所在烈度区的烈度值,其中烈度值高于所在区烈度值的“孤岛”为高烈度异常区;反之则为低烈度异常区。烈度异常区在震害调查中常会被发现,并且有的还多次重复出现。例如,北京德胜门城楼的附近区域,在1679年三河—平谷地震和1976年唐山地震中都遭受到严重破坏,是高烈度异常区;而唐山西北约50 km的玉田县在这两次地震中都是低烈度异常区。

根据目前掌握的资料,在破坏性地震震害调查中出现高烈度异常区的次数较多。例如,1679年三河—平谷8.0级地震,在距震中约500 km的范围内,出现了徐沟、太谷高烈度异常区;1966年的邢台 $M_s7.2$ 地震,在距震中约80—100 km处,出现了井陘—获鹿高烈度异常区(陈达生,1981);1976年唐山 $M_s7.8$ 地震,在距震中西南约40 km处,出现了一个约302 km²的高于IX度的高烈度异常区(刘曾武等,1984);1988年云南澜沧—耿马 $M_s7.2$ 地震,距震中20多千米的耿马县城是VII度区内的VIII度高烈度异常区(俞维贤等,1994);1996年丽江 $M_s7.0$ 地震,在丽江盆地出现了白华开文村、文荣自然村、文智十队和新团六队等X度高烈度异常区(韩新民,周瑞琦,1997);2008年汶川 $M_s8.0$ 地震,在距震中约200 km的汉源老县城及附近地区是VI度区内的VIII度高烈度异常区,异常区呈近似椭圆分布,长轴沿北西—南东方向,总长约30 km,短轴总长约17 km,面积约400 km²(高孟潭等,2008;薄景山等,2009)。

与高烈度异常区相比,低烈度异常区出现的次数则较少。例如,1679年三河—平谷8.0级地震,在重灾区内有玉田、安次和永清等低烈度异常区(陈达生,1981);1976年唐山 $M_s7.8$ 地震,在VII度区内有玉田VI度低烈度异常区,该区东西长约30 km,南北宽约13 km,面积约300 km²(田启文等,1981);1996年丽江 $M_s7.0$ 地震,在极震区北部,界于黑水—大东与大具—鸣音之间,出现了波丽落—西菜板低烈度异常区,该区的综合震害指数为0.4左右,其中最低为卡子村的0.27(韩新民,周瑞琦,1997)。

3 烈度异常形成原因

从工程地震的角度来看,烈度异常形成的原因多与地形地貌、土层特性、土层结构、

断层及地下水位等场地条件有关。但对不同的烈度异常区,这些因素又不一定是共同存在或唯一的(张国庆,朱秀岗,1981)。此外,烈度异常与地震波传播中的辐射干涉现象也有一定关系。因为地壳中存在着各种界面,地震波在其上传播时会发生反射、折射现象,并能够产生新的地震波型。不同类型的波施加到结构物的基础上,会产生各种辐射干涉,或者像光线一样产生聚焦作用,或者相互抵消,从而加剧或减轻震害(胡聿贤,2006)。烈度异常形成原因、分布规律的研究不仅是工程选址、土地规划等工作的主要依据之一,还是检验理论分析结果的重要根据。

3.1 地形条件

地形条件对地震动的影响是一个比较复杂的问题,尤其在山区或丘陵地带,地形变化大,易造成破坏程度不同的震害现象(王钟琪等,1983)。陈国达早在1936年4月1日的广东灵地震中就注意到地形条件对烈度的影响(陈国达,1938)。他指出,“在烈震区域里,有许多村落因位于斜坡甚急的山脊上,或倾角较大的山坡上,以致其损失远较他处为大。”1970年通海地震后,我国学者开始系统研究地形条件对烈度异常的影响。美国学者在1971年圣费尔南多地震后,才开展地形条件对烈度异常的理论 and 实验研究工作。大量的震害调查,强震观测和理论研究表明:①不规则地形对震害和地震动的影响较大,一般可使峰值加速度增大30%—50%;②坐落在孤立突出的山包或山梁顶部、陡坎的房屋一般较平地同类场地土上的同类房屋破坏要重;③盆地内的面波、盆地聚焦效应和边缘效应的作用,会使盆地内地震持时显著增长,长周期地震动分量显著放大,加重盆地内高层建筑、大跨桥梁等自振周期较长结构物的破坏程度(周锡元等,1991;Boore,1972;Celebi,1991;Geli *et al*,1988;Graves *et al*,1998;Kawase,1996;Pitarka *et al*,1998;Somoerville,1998)。

地形条件对烈度异常影响的实例较多。例如,1976年唐山地震,位于景忠山顶部的庙宇式建筑群大多严重破坏或倒塌,烈度高达IX度;而位于山脚周围的4个村庄,则只有少数石砌山墙有顶部倒塌或外皮脱落的现象,震害很轻(陈达生,1981)。1989年美国Loma Prieta地震,坐落在Robinwood山脊顶上的房屋都遭受了很大的破坏,而位于邻近悬崖上的房屋却破坏较轻,看上去似乎没有影响(刘洪兵,朱晞,1999)。2008年汶川地震,坐落在高70—80 m孤立山包上的来雁塔,在地震中被震断且上部折下;坐落在武都窦圉山上的云居寺,震后房屋破坏严重,几乎成为废墟,平均震害指数为0.5(王伟,2011)。1995年日本Kobe地震,由于盆地边缘效应和破裂方向效应的共同作用,在大阪盆地边缘处形成了一个长约20 km、宽约1 km的呈条带状的高烈度异常区(Pitarka *et al*,1998)。2008年汶川地震,由于盆地边缘效应和土层放大效应的共同作用,从宝鸡到眉县沿着渭河盆地的边缘出现VII度高烈度异常区(王海云,2011)。这些实例均体现了地震波的地形放大效应,它主要由地震波在土层中或到达地表后发生的折射与反射形成。

3.2 土层特性

3.2.1 场地土刚性

场地土刚性反映了场地土的软硬程度。大量震害调查结果表明,位于冲积土层、沼泽地等松散软弱土层上的建(构)筑物比位于坚硬土层或基岩上的破坏严重。Wood(1908)最先详细研究场地土刚性对震害的影响,他根据1906年旧金山大地震对旧金山市的宏观调查结果,认为人工填土和沼泽地上的震害比坚硬基岩上的重得多。胡聿贤等(1980)结合通

海地震和唐山地震的震害调查资料,认为在同一震级下基岩上的地震动幅值小、持时短且震害轻.王钟琪等(1983)指出,软弱土层对地震动的长周期分量具有选择性放大作用,易与其上的自振周期较长的建(构)筑物产生类共振作用,使震害加重.例如,唐山地震中,Ⅺ度区内位于大城山和凤凰山附近基岩上的房屋和工厂震害相对较轻;而墨西哥 Michoacan 近海地震中,墨西哥城内软弱地基土上的 10—12 层建筑物均破坏严重.

3.2.2 覆盖土层厚度

早在 1923 年的日本关东地震中人们就发现覆盖土层厚度对地表震害有一定的影响,这种影响在后来的一系列破坏性地震中都有体现.当前,通过对震害调查以及强震资料的分析研究,得出的主要结论是:覆盖土层越厚,地表反应谱长周期的频谱成分愈显著,反应谱曲线愈向后移,归一化反应谱的特征周期越大,土体自振周期越大;基岩上面的覆盖土层对基岩输入的地震动有明显的放大作用,一般峰值加速度可被放大 2—4 倍(周锡元等,1991;薄景山等,2003).例如,1976 年的委内瑞拉地震,加拉加斯市内高层建筑的破坏具有非常明显的地区性,主要集中在市内冲积层最厚的地方,而在中等厚度的一般地基上,破坏最严重的是中等高度的房屋.此外,李秀领(2003)在对数百个钻孔资料研究的基础上,根据不同的条件计算了不同覆盖土层厚度场地的地表峰值加速度和归一化反应谱的特征周期.结果表明,在不同幅值的地震动输入条件下,当覆盖土层厚度小于 30 m 时,自由地表的峰值加速度变化显著;当覆盖土层厚度超过 30 m 时,自由地表的峰值加速度变化较小,几乎不受覆盖土层厚度的影响.

由于覆盖土层厚度和场地土刚性对地震动的长周期分量都有选择性的放大作用,当具有较长自振周期的柔性结构位于又厚又软的场地上时,在地震动的作用下就会出现较重的震害,形成高烈度异常区.相反,当其位于基岩或基岩上有较薄覆盖土层的场地上时,就可能形成低烈度异常区.

3.2.3 液化土层

液化土层对烈度异常有一定的影响.胡聿贤等(1980)曾指出,砂土液化与震害有明显的关系.因为在强烈的地震动作用下,饱和砂土中的空隙水压力骤然上升,土颗粒间的有效应力急剧下降或丧失,使土颗粒处于局部或全部悬浮状态,导致砂层完全丧失抗剪强度和承载能力而发生液化.液化后出现的地裂缝、错位、滑坡及不均匀沉陷等现象,加重了地表的震害程度,从而形成高烈度异常区.例如,齐文浩等(2010)在分析汶川地震汉源高烈度异常区的形成原因时,认为位于背后山滑坡底面的液化土层,在地震作用下发生液化,加剧了背后山滑坡的复活,从而使汉源县城的震害加重.然而,当液化土层埋深较深时,对地震作用却有一定的隔震效果.这是因为土层在深部液化后,能够阻止剪切波继续向上传播、削弱地表面的振动,减轻了地面或建(构)筑物的震害,形成低烈度异常区.这种现象早在通海地震的震害考察中就被发现,并多次出现在海城和唐山等地震中,当地民众称这种现象为“湿震不重干震重”,即在严重喷砂冒水的地方,房屋的震害要轻于附近轻微或没有喷砂冒水的地方.

3.3 断层

在工程地震领域,断层通常分为发震断层和非发震断层.以突发而快速的方式运动并引发地震的断层称为发震断层;发震断层以外的其它构造性断层都称为非发震断层.发震断层在地震中的破坏行为主要表现在两方面:一是对震害分布的影响极大,地震地表破裂

或错动无坚不摧，会使横跨断层的结构严重损坏；二是断层发震时在其两侧产生的地震动强度不同，造成震害差异显著(薄景山等，2003)。例如，1999年台湾集集地震，断层错断了大量的桥梁和水坝，断层两边的道路隆起，断裂、房屋倾斜倒塌；而在距断层出露迹线不远的地方，震害则迅速减轻。1976年龙陵7.4级地震，距离团树村约50 km的场地，由于团树断层的影响出现了Ⅷ度高烈度异常，比其周围基岩场地的烈度高2度(李山有等，2003a)。

非发震断层对烈度无明显影响，只对断层破碎带上的场地震害有所加重，但其影响不如发震断层明显。李山有等(2003b)用数值模拟方法分析了断层场地的地震反应特征。结果表明，断层破碎带内的地震动比两侧复杂，不仅使峰值加大，持续时间也大为加长；断层破碎带对地震动影响的空间范围约为破碎带宽度的1.5倍。陈达生(1981)通过对多个烈度异常区震害资料的分析，认为远离极震区的非发震断层和离震中较近但与发震断层不相交的非发震断层，对震害无明显的影响；只有那些与发震断层相交、离极震区较近以及发震断层端部附近规模较大或破碎较严重的非发震断层，会使震害有不同程度的加重。周正华等(2003)用通海地震、大关—永善地震、海城地震和澜沧—耿马地震的震害调查资料，研究分析了断层对震害的影响。结果表明，发震断层和断层破碎带等是影响断层场地震害的主要因素，非发震断层对震害没有明显的影响。可见，发震断层对通过区域的烈度有显著影响，特别是断层破碎带和断层主动盘对烈度的影响更加明显。

3.4 土层结构

土层结构通常是指地面下第四纪覆盖土层的不同排列组合以及下伏基岩的表面形态等。它对烈度异常的影响主要集中在基岩起伏和软弱夹层两个方面(薄景山等，2003)。早在1970年Dezfulian和Seed就用有限元法研究了基岩起伏对地震动的影响，他们根据不同的土层特性、土层厚度和基岩倾斜角等进行了大量的分析计算。结果表明，基岩面的形状对覆盖土层的地面反应有影响，影响程度视土性、土层厚度、基岩倾斜角和输入地震动的特征而定，总的趋势是基岩倾斜度越小，峰值放大系数越大，地面震害越重(Dezfulian, Seed, 1970, 1971)。此外，国内的一些学者也从不同角度研究了软弱夹层对地震动的影响，认为该影响取决于软弱夹层厚度、埋深、位置以及基岩输入地震动的特征。当其厚度较大且埋深较深时，具有一定的隔震作用，不仅不会加重震害，还能使地面震害减轻，形成低烈度异常区(王钟琪等，1983；李秀领，2003；刘曾武，1994；陈国兴，陈继华，2004)。

3.5 地下水位

早在麦德维捷夫等研究地震烈度的影响因素时，就指出地下水位的高低对地震烈度的分布有一定影响(刘快胜，1979)。他们在震害考察的基础上提出，当地下水位大于10 m时，可不考虑其对烈度的影响；当地下水位为4 m时，烈度提高半度；当地下水位接近地表时，烈度则提高一度。刘快胜(1979)在分析我国大震时不同地基上的震害情况后认为，在相同土质条件下，水位越浅，震害越重；地下水对软弱土层震害影响较大，对密实土层震害影响较小；地下水位在5 m以内时，对震害影响明显，大于5 m时，对震害影响较小。另外，地下水位的高低与砂土液化也有着密切联系，总的趋势是地下水位越高，砂土在地震动作用下的抗液化能力越低，越易出现砂土液化现象，形成高烈度异常区。

由地下水位不同而引起烈度异常的实例在许多地震中都能见到。例如，1970年通海地震，Ⅷ度区内两个相邻村庄的地基土特性完全相同。一个村庄地下水埋深2.2 m，震害指

数为 0.44; 另一村庄地下水埋深 0.8 m, 震害指数为 0.58. 这一结果正是由地下水位的不同导致的烈度异常现象(刘快胜, 1979). 1976 年的唐山地震, 在北京潮白河与北运河中下游冲积平原内出现了Ⅶ—Ⅷ度高烈度异常区, 较高地下水位是其异常的一个重要原因. 2008 年汶川地震, 液化现象在整个主震区都有出现, 特别是在Ⅵ度区内还出现了多处液化区, 形成高烈度异常区. 袁晓铭等(2009)通过现场调查与分析认为, 这些液化主要出现在广大的农村地区, 原因之一就是市区与郊区的地下水位差异, 并指出在彭州市以北等地下水位在 5—10 m 的区域基本上没有液化现象出现. 总之, 地下水位是影响烈度异常形成的可能原因之一, 特别是在有液化土层存在的情况下, 这种影响表现得更加明显.

4 烈度异常研究进展

1966 年邢台地震后, 国内开始开展烈度异常现象的研究工作. 当时发现震后宏观考察的地震烈度等值线图不再是规则的椭圆图像, 而是带有烈度异常区的不规则椭圆图像(刁桂苓, 李钦祖, 2006). 邢台地震烈度异常原因的研究, 为场地条件对地震破坏影响开辟了研究的又一途径, 得到了场地条件能影响烈度分布的重要研究成果. 在国外, 1985 年墨西哥地震和 1995 年阪神地震后, 才深切体会到泻湖、盆地等软弱地基内部, 地震波的多次反射能导致严重震害的问题. 震后现场宏观考察与测试、强震记录分析和数值模拟是现阶段研究烈度异常的主要方法和手段.

4.1 现场宏观考察与测试

震后现场宏观考察方法是震害调查中最重要的方法, 它能及时、准确地获得现场震害资料, 为震害分布规律和烈度异常的研究提供第一手资料; 现场测试法是通过钻探、地脉动测试和人工爆破等方法, 对异常区的区域地质构造、场地土层特性及地震波传播特性等进行分析和研究. 两种方法相辅相成, 在历次地震烈度异常的研究中都要使用, 能对异常的原因做出较为全面、客观地解释.

邢台地震后, 姚振兴等(1974)对井陘—获鹿高烈度异常区的形成原因进行了分析. 他们在邢台地震台网的基础上, 布设了一组从震中到异常区的流动台站, 研究了从极震区到异常区一带的地震波传播特点、振幅变化规律以及烈度异常的原因. 同时还设置了一套多道同步观测系统, 研究不同土质条件、地形条件及断层破碎带对烈度的影响. 结果表明, 高烈度异常主要由地壳界面的全反射横波造成; 厚土层(约 20 m)和含砂卵石、地下水的土层对烈度值的影响较大, 一般较基岩上的烈度值高 1—2 度.

唐山地震后, 田启文等(1981)通过对玉田低烈度异常区震害资料、区域地质构造和钻孔资料的研究, 得出了震害指数与航测判读倒塌率、宏观烈度的关系, 认为玉田特定的区域地质构造背景和场地条件是形成低烈度异常的主要原因. 刘曾武等(1984)根据现场钻探、波速测试和震害资料研究了宁河高烈度异常区, 认为土质刚度较低和大面积液化是该地区烈度异常的主要原因, 并用平均剪切模量比解释了玉田与宁河震害悬殊的原因. 杨光和刘曾武(1994)利用现场实测资料, 对玉田、宁河两异常区内外共 51 个场地进行了地震反应模拟计算, 研究了地震动参数与场地指数的关系, 认为场地指数能较好表达场地条件对地震效应的影响. 此外, 1987—1988 年, 中日研究人员还联合在玉田低烈度异常区开展了地震小区划研究, 布置 6 个人工爆破点和 83 个振动观察点, 对玉田地区进行了大范围的人工地震波现场测量和分析, 研究了玉田的深部地质构造和产生烈度异常的原因, 最后认为

引起异常的主要原因是场地条件.

汶川地震后,高孟潭等(2008)通过分析总结汶川地震汉源高烈度异常区的宏观考察特征,初步探讨了烈度异常的可能原因,认为导致该地区震害重的主要因素是震源过程及其能量释放空间分布和场地条件.薄景山等(2009)在汉源科考基础上,结合强震和土体力学参数资料,研究了背后山滑坡和汉源特殊土层结构对地震动的影响,认为背后山滑坡的复活和特殊土层结构对地震动的放大是引起烈度异常的主要原因.齐文浩等(2010)通过对震害调查和地脉动测试资料的研究,认为汉源高烈度异常的可能原因是砂土液化、滑坡和场地软弱等.

此外,还有很多基于现场宏观考察和测试方法,对其它破坏性地震烈度异常现象开展的研究工作.总的来说,该法能较好地解释烈度异常的原因,但对异常机理更深一步的研究还需配合其它方法使用.

4.2 强震记录分析

强震记录分析法是一种估计场地地震反应的经验方法,即利用实际地震观测资料,甚至地脉动资料来分析场地的地震动反应.该法由于不需要知道场地土层的详细性质,操作简单且物理含义明确,受到了广大科技工作者的青睐.该法主要包括有传统谱比法(Borcherdt, 1970)、广义线性反演法(Andrews, 1986)及水平/垂直谱比法(H/V法)(Nakamura, 1989)等.

Bonilla等(1997)根据1994年美国北岭地震余震的加速度时程记录,分别利用传统谱比法、广义线性反演法和H/V法研究了加州圣费尔南多山谷烈度异常区的场地放大效应,认为品质因子对场地反应的影响较大,且在高频段表现尤为突出,从理论上解释了山谷内场地反应异常的原因.Parolai等(2004)用广义线性反演法与H/V法对比分析了1999年伊兹米特地震的262条余震加速度时程记录,研究了烈度异常区的地形放大效应.结果表明,复杂地形对地震动的放大较大,放大因子最大为5.王海云和谢礼立(2010)利用自贡地形台阵记录的汶川地震主震加速度时程,基于传统谱比法分别研究了地形条件和场地土层特性对地震动的放大效应,分析了自贡地区烈度异常的原因.结果表明,地形场地的放大效应在高频段显著,且随高度有增加的趋势;土层场地的放大效应较地形场地有显著增大.王海云(2011)利用在渭河盆地获取的汶川地震主震加速度时程,采用考虑几何衰减的传统谱比法研究了25个强震动台站附近区域的土层放大作用,认为汶川地震中从宝鸡到眉县沿渭河盆地边缘分布的Ⅶ度烈度异常区是盆地边缘效应和土层场地放大作用共同作用的结果.可见,强震记录分析法能较好地解释烈度异常现象,真实反映场地的地震动反应.但是由于国内强震台站数量少且分布不均的限制,导致能用于科学研究的强震记录少,所以在烈度异常现象的研究上强震记录分析法尚应用较少.

4.3 数值模拟

数值模拟法在强地震动反应分析中的应用较为普遍,但用于全面分析烈度异常产生机理的研究尚较少,多数是对其中部分因素进行模拟分析,这与异常区内地形和场地土层条件等复杂多变的特性有关.目前,研究地形和场地土层条件等对地震动影响的数值分析方法很多,如有限元法、非线性地震反应分析法、有限差分法、频域等效线性化波动分析法、特征线法、谱元法及边界元法等(廖振鹏,李小军,1989;张立,陈清军,2007;胡元鑫等,2011).由于每个方法的侧重点不尽相同,在数值模拟分析时常被混合使用.

孙若昧等(2000)采用多阶振型和有限差分联立的混合法,根据北京西集一郎府地区的地质条件,模拟唐山地震在该区引起的剪切波运动,计算了地面强震动峰值加速度和总能量,由峰值加速度与宏观烈度的关系解释了该区出现高烈度异常的原因. Olsen(2000)针对洛杉矶盆地在9次不同地震中震害都较重的现象,采用有限差分法和有限断层模型,模拟了盆地内土层在不同地震中的三维地震反应,采用峰值速度作为评定放大效应的指标,解释了震害较重的异常现象. 李山有等(2003a)用显示有限元法模拟了断层场地在脉冲地震波斜入射情形下的地震反应,对团树断层场地在多次地震中出现烈度异常的原因进行了研究. 结果表明,基岩山脚附近土层场地的放大比远离基岩山脚和基岩山区的场地平均高2—4倍. 胡元鑫等(2011)结合谱元法与ASTER DEM模型,模拟了龙门山区域在汶川地震中的三维地形效应,结果表明陡峻地形对地震波水平分量的影响较竖向分量,山顶和山脊区域的峰值加速度最大. 可见,数值模拟法在分析问题能较好地给出地震动反应的理论解,定量地解释了烈度异常现象.

此外,用解析法同样可对烈度异常进行研究,因为解析法在问题的本质分析上较数值模拟法可靠,不仅可以验证数值法的精度,还能佐证强震记录分析法的计算结果. 但问题是,解析法对数学物理计算方法的要求较高,对边界条件、本构关系及计算参数的要求也很苛刻,在数学计算上也存在一定的限制,使用时不能较全面地考虑地形、场地土层力学特性和地质构造等因素对烈度异常的影响,所以在烈度异常现象的研究上解析法一般很少应用.

5 讨论与结论

在破坏性地震的震害调查中,烈度异常区的出现是较为普遍的现象. 2008年汶川特大地震汉源Ⅷ度高烈度异常区的出现,对汉源老县城造成严重震害的同时,也让地震烈度异常现象再次引起学术界和各级政府的广泛关注. 应该强调,在当前全球地震活动性增强的背景下,做好防震减灾工作,保障城市和农村的地震安全,有效减轻地震造成的人员伤亡和经济损失已经成为我国经济、社会协调发展的迫切需求. 所以,现阶段加强对烈度异常现象的研究,不仅具有重要的工程应用价值,还对整个社会的防震减灾工作具有强大的推动作用.

本文从介绍烈度概念起源开始,对烈度异常的特点、形成原因以及研究进展进行了系统的分析与总结. 总的来说,现阶段对烈度异常现象的研究还不全面,大多是基于宏观震害资料、区域地质构造以及局部场地条件等方面的研究,研究成果不能全面充分地解释烈度异常的原因,且对异常现象的定性分析较多,缺少一定的定量分析,特别是缺乏基于强震记录的定量分析.

在中国发生的大地震中,有两种烈度异常现象比较典型且具有科学研究价值:一是唐山地震的玉田Ⅵ度低烈度异常现象;二是汶川地震的汉源Ⅷ度高烈度异常现象. 所以,进一步的研究工作应以玉田低烈度异常区和汉源高烈度异常区为研究烈度异常的重点,在总结提炼其宏观震害特征的基础上,综合考虑震源机制、区域地质构造、埋藏基岩地形、基岩地震动输入、局部场地条件、地震波传播特性以及土层非线性等多种因素,分别建立能够反映土层性质、土层结构、基岩地形及区域构造背景等方面的地震反应分析模型,进行异常区场地地震反应分析. 在此基础上,概括产生烈度异常的各种可能条件,并结合强震

记录分析结果加以修正。最后,综合定性和定量分析计算的成果,提出一套判别烈度异常的工程方法,这不仅能推动对烈度异常形成原因和分布规律的研究,还能为城市防震减灾规划的制定,地震灾害损失的评估,场地规划利用,工程选址,以及抗震设计等提供科学的基础资料。

参 考 文 献

- 薄景山,李秀领,李山有. 2003. 场地条件对地震动影响研究的若干进展[J]. 世界地震工程, 19(2): 11-15.
- 薄景山,齐文浩,刘红帅,刘博,刘德东,孙有为. 2009. 汶川特大地震汉源烈度异常原因的初步分析[J]. 地震工程与工程振动, 29(6): 53-64.
- 陈达生. 1981. 几次大地震烈度异常概况[R]. 哈尔滨:中国科学院工程力学研究所: 1-14.
- 陈国达. 1938. 民国 25 年 4 月 1 日广东灵山地震记略[J]. 地质评论, 3(4): 427-448.
- 陈国兴,陈继华. 2004. 软弱土层的厚度及埋深对深厚软弱场地地震效应的影响[J]. 世界地震工程, 20(3): 66-73.
- 刁桂苓,李钦祖. 2006. 邢台地震的科学研究[J]. 华北地震科学, 24(2): 341-346.
- 高孟潭,陈学良,俞言祥,雷建成. 2008. “5·12”汶川 8.0 级地震汉源烈度异常机理的初步探讨[J]. 震害防御技术, 3(3): 216-223.
- 国家地震局震害防御司. 1990. 中国地震烈度表(1980). 地震工作手册[M]. 北京:地震出版社: 285-287.
- 韩新民,周瑞琦. 1997. 丽江 7.0 级地震的烈度分布[J]. 地震研究, 20(1): 35-45.
- 胡聿贤,孙平善,章在墉,田启文. 1980. 场地条件对震害和地震动的影响[J]. 地震工程与工程振动, 试(1): 35-41.
- 胡聿贤. 2006. 地震工程学[M]. 第二版. 北京:地震出版社: 44-66.
- 胡元鑫,刘新荣,罗建华,张梁,葛华. 2011. 汶川震区地震动三维地形效应的谱元法模拟[J]. 兰州大学学报, 47(4): 23-31.
- 李山有,王学良,金星,杨柏坡,孙平善. 2003a. 团树断层场地地震反应的数值模拟[J]. 地震工程与工程振动, 23(4): 17-21.
- 李山有,马强,武东坡,杨柏坡. 2003b. 断层场地地震反应特征研究[J]. 地震工程与工程振动, 23(5): 32-37.
- 李秀领. 2003. 土层结构对地表地震动参数影响的研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所: 8-13.
- 廖振鹏,李小军. 1989. 地表土层地震反应的等效线性化解法[C]//地震小区划:理论与实践. 北京:地震出版社: 141-153.
- 刘洪兵,朱晔. 1999. 地震中地形放大效应的观测和研究进展[J]. 世界地震工程, 15(3): 20-25.
- 刘快胜. 1979. 地下水对震害影响的讨论[J]. 西北地震学报, 1(1): 82-85.
- 刘曾武,吕根盛,吴显德,王东强,杨光,董恩长. 1984. 唐山地震宁河烈度异常区场地影响的研究[R]. 哈尔滨:中国科学院工程力学研究所: 1-14.
- 刘曾武. 1994. 考虑软弱夹层的影响对设计反应谱修正的简易方法[C]//中国地震学会地震工程专业委员会,中国建筑学会抗震防灾研究会编. 第四届全国地震工程会议论文集(一). 哈尔滨:国家地震局工程力学研究所: 86-91.
- 齐文浩,薄景山,郭讯,刘德东,刘奇斌. 2010. 汶川地震中一个特殊场地研究初探[J]. 地震工程与工程振动, 30(4): 53-58.
- 孙若昧, Vaccari F, Panza G F. 2000. 局部地质条件对强地面运动影响的剪切波模拟[J]. 地球物理学报, 43(1): 81-89.
- 田启文,孙平善,邹夕林,田洪清. 1981. 唐山地震玉田低烈度异常区调查报告[R]. 哈尔滨:中国科学院工程力学研究所: 1-8.
- 王海云,谢礼立. 2010. 自贡市西山公园地形对地震动的影响[J]. 地球物理学报, 53(7): 1631-1638.
- 王海云. 2011. 渭河盆地中土层场地对地震动的放大作用[J]. 地球物理学报, 54(1): 137-150.
- 王伟. 2011. 地震动的山体地形效应[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所: 1-22.
- 王钟琪,谢君斐,石兆吉. 1983. 地震工程地质导论[M]. 北京:地震出版社: 152-195.
- 谢毓寿. 1957. 新的中国地震烈度表[J]. 地球物理学报, 6(1): 35-47.
- 杨光,刘曾武. 1994. 场地指数与地震动参数的关系[J]. 华北地震科学, 12(3): 43-52.
- 姚振兴,陈培善,肖承邨,徐国明. 1974. 1966 年邢台地震的烈度异常[J]. 地球物理学报, 17(2): 106-120.
- 俞维贤,谷一山,毛玉平,赵曲东. 1994. 耿马县城烈度异常的地震地质及场地地质条件分析[J]. 地震研究, 17(2): 177-182.

- 袁晓铭, 曹振中, 孙锐, 陈龙伟. 2009. 汶川 8.0 级地震液化特征初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, **28**(6): 1288–1296.
- 张国庆, 朱秀岗. 1981. 玉田低烈度异常的地质分析[J]. 地震, **1**(3): 27–30.
- 张立, 陈清军. 2007. 场地地震反应的比较研究[J]. 四川建筑科学研究, **33**(1): 137–141.
- 张敏政. 2010. 地震烈度及其评定[J]. 防灾科技学院学报, **12**(1): 1–6.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2008. 中国地震烈度表(GB/T 17742-2008) [S]. 北京: 中国标准化出版社: 1–4.
- 周锡元, 王广军, 苏经宇. 1991. 场地·地基·设计地震[M]. 北京: 地震出版社: 1–22.
- 周正华, 张艳梅, 孙平善, 杨柏坡. 2003. 断层对震害影响的研究[J]. 自然灾害学报, **12**(4): 20–24.
- Andrews D J. 1986. Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size[C]//Das S, Boatwright J, Scholz C H eds. *Earthquake Source Mechanics*. Washington D C: American Geophysical Union: 259–268.
- Bonilla L F, Steidl J H, Lindley G T, Tumarkin A G, Archuleta R J. 1997. Site amplification in the San Fernando Valley, California; Variability of site-effect estimation using the S-wave, Coda, and H/V methods[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **87**(3): 710–730.
- Boore D M. 1972. A note on the effect of simple topography on seismic SH waves[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **62**(1): 275–284.
- Borcherdt R D. 1970. Effects of local geology on ground motion near San Francisco bay[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **60**(1): 26–61.
- Celebi M. 1991. Topographical and geological amplification-case studies and engineering implications[J]. *Structural Safety*, **10**: 199–217.
- Dezfulian H, Seed H B. 1970. Seismic response of soil deposits underlain by sloping rock boundaries[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **96**(6): 1893–1916.
- Dezfulian H, Seed H B. 1971. Response of nonuniform soil deposits to travelling seismic waves[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, **97**(SM1): 27–46.
- Geli L, Bard P Y, Jullin B. 1988. The effect of topography on earthquake ground motion; A review and new results[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **78**: 42–63.
- Graves R W, Pitarka A, Somerville P G. 1998. Ground-motion amplification in the Santa Monica area; Effects of shallow basin-edge structure[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **88**(5): 1224–1242.
- Kawase H. 1996. The cause of the damage belt in Kobe: The basin-edge effect, constructive interference of the direct S wave with the basin induced diffracted/Rayleigh waves[J]. *Seism Res Lett*, **67**(5): 25–34.
- Nakamura Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface[J]. *QR of RTRI*, **30**(1): 25–33.
- Olsen K B. 2000. Site amplification in the Los Angeles basin from three-dimensional modeling of ground motion[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **90**(6B): S77–S94.
- Parolai S, Bindi D, Baumbach M, Grosser H, Milkereit C, Karakisa S, Zünbül S. 2004. Comparison of different site response estimation techniques using aftershocks of the 1999 Izmit earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **94**(3): 1096–1108.
- Pitarka A, Irikura K, Iwata T, Sekiguchi H. 1998. Three-dimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan, earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **88**(2): 428–440.
- Somerville P G. 1998. Emerging art: earthquake ground motion[C]//Dakoulas P, Yegian M, Holtz D eds. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publications, **2**(75): 1–38.
- Wood H O. 1908. Distribution of apparent intensity in San Francisco in the California earthquake of April 18, 1906[R]//*Report of the State Earthquake Investigation Commission*. Washington, D C: Carnegie Institution of Washington Publication: 220–245.

作者简介



姚丽 中国地震台网中心副研究员。2005年中国科学技术大学地球物理专业毕业，获理学硕士学位；2009年中国科学院空间科学与应用研究中心空间天气专业毕业，获博士学位。现从事地磁与空间物理研究工作。

研究工作。



石云 防灾科技学院讲师，湖南师范大学水文水资源专业在读博士研究生。2004年湖南科技大学地理科学专业毕业，获理学学士学位；2008年湖南师范大学自然地理专业毕业，获理学硕士学位。2010至今主要从事地震地下流体研究。

今主要从事地震地下流体研究。



周洪娟 哈尔滨工业大学(威海)讲师，哈尔滨工业大学信号与信息处理专业的在读博士研究生。2005年天津大学通信与信息系统专业毕业，获硕士学位。曾从事雷达信号预处理等方面的研究。现主要从事

舒曼谐振观测分析与地震电磁信号处理等方面的研究。



李孝波 中国地震局工程力学研究所在读博士研究生。2008年中国地质大学(北京)土木工程专业毕业，获工学学士学位；2009年进入中国地震局工程力学研究所攻读岩土工程专业硕士学位，2011年获得直

接攻读岩土工程专业博士学位资格。主要从事岩土工程抗震和场地地震反应方面的研究工作。



孙小龙 中国地震局地壳应力研究所助理研究员，中国地质大学(北京)在读博士研究生，2007年中国地震局兰州地震研究所构造地质学专业毕业，获理学硕士学位。曾从事地震与地下水相互关系的研究。

现从事地震地下流体动力学与地震监测预报研究工作。



蔡寅 山东省地震局工程师。2007年大连理工大学软件工程专业毕业，获工程硕士学位。曾从事地震信息化软件开发研究工作。现从事强震动数据分析、地震烈度速报及强震预警研究工作。地球物理

学会会员。

注：池顺良、孟令媛的简介分别见本刊：Vol. 14, No. 1；Vol. 33, No. 5.