

# 减轻地震灾害的物理学问题\*

吴忠良<sup>1,2,†</sup>

(1 中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

(2 中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要** 减轻地震灾害的研究通常包括地震危险性评估、地震危害预测、地震灾害的减轻三个环节。物理学在减轻地震灾害的研究与应用中具有重要意义。文章从强地面运动与地震的工程灾害、复杂系统与地震的社会灾害、地球应力场的变化与地震预测等三个不同的侧面,介绍了在减轻地震灾害的实际工作中提出的一些重要的物理问题。这些问题既是目前地震学家、工程地震学家和地震工程师普遍关注的基础科学问题,也同时与当代物理学研究的一些前沿领域紧密地联系在一起。

**关键词** 地震,地震危险性,地震危害,强地面运动,地震预测预报

## Physics for the reduction of earthquake disasters

WU Zhong-Liang<sup>1,2,†</sup>

(1 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

(2 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** The reduction of earthquake disasters includes the assessment of seismic hazard, estimation of seismic risk, and management of earthquake disasters. Physics plays an important role in the research and applications related to seismic hazard reduction. We discuss the important physical issues related to seismic disaster reduction, including the strong ground motion and engineering impact of earthquakes, complex systems and social impact, the change of stress state within the Earth, and earthquake prediction. These problems are of great concern to seismologists, engineering seismologists and earthquake engineers, and are closely related to the frontiers of modern physics.

**Key words** earthquake, earthquake hazard, earthquake risk, strong ground motion, earthquake forecasting and prediction

1976年,唐山发生强烈地震,损失惨重。据说,当时物理学家郝柏林和他的同事们跑到国家地震局,动情地说:“让我们干点什么吧——干什么都行,只要我们有。”

强烈地震因其巨大的经济损失、人员伤亡和社会影响,是人类社会面对的一种严重的自然灾害。减轻地震灾害一直是科学家、各国政府、新闻媒体、社会公众普遍关注的问题之一。随着科学技术的发展,人们越来越多地认识到,物理学可以为减轻地震灾害做出多方面的贡献,其所涉及科学问题,并不仅限于大家熟知的地震预测问题。

## 1 地震的工程灾害

地震本身并不能造成灾害。地震灾害主要是通过地震引起的人工建筑、工程设施和社会系统的破坏而造成的。地震引起的地基失效和断层永久位移,可以造成地下和地面工程的破坏;地震引起的长周期强地面运动,可以造成大尺度的工程设施(例如

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号 2004CB418406)资助项目  
2004-06-21 收到

† Email: wuzhl@gscas.ac.cn

立交桥和高层建筑)的破坏;地震引起的高频强地面运动,是普通民用建筑和工程设施破坏的一个主要原因。地震所造成的破坏,通常用烈度(intensity)来定量地表示,我国台湾省称为“震度”。传统的地震烈度是用人对地震动的感觉、地震引起的人工建筑和工程设施的破坏,以及地面上的地形地貌的改变来分级的。现代工程设计中通常采用地震引起的强地面运动的度量,例如峰值加速度,来确定地震的烈度。

地震的震源通常可以用地震断层来描述。地震越大,地震断层的空间尺度和断层上的平均错动量(slip)就越大,地震断层上的错动的分布,通常是高度不均匀的,地震所辐射出的高频地震波,来自断层面上尺度较小的凹凸体(asperity)的破裂。地震的大小通常用震级(magnitude)来表示,我国台湾省称为“规模”。从物理的角度说,震级表示地震辐射能量的数量级:震级增加2级,辐射能量增加3个数量级。地震越大,距离地震的震源越近,烈度就越大。

烈度同时取决于地震的类型和所考虑的地区下方的地球介质的结构。伴随着明显的垂直运动的地震断层,其两侧的强地面运动具有不对称的特点<sup>[1]</sup>。盆地型的沉积层结构对地震地面运动具有明显的放大效应。不同厚度的沉积层往往具有不同的特征周期,如果建在这里的工程结构的特征周期与沉积层的特征周期接近,那么地震时就会由于类似于共振的机制而受到比较大的破坏。地震波在复杂的地球介质中有时还可形成类似于“聚焦”的效应,从而使强地面运动在一些地方明显增强<sup>[2]</sup>。但另一方面,地震断层在滑动过程中的“润滑效应”,有时却可以使滑动量很大的地方烈度反而偏小<sup>[3]</sup>。以前,人们只能从实际情况出发,对这些规律进行经验性的、定性的、粗略的总结。现在,地震学家已经可以利用复杂介质中的地震波传播理论,定量地解释地震强地面运动和地震破坏的一些主要特征,这也是波动物理学中的一个有实际意义的、活跃的研究领域。

在地震学中,这类问题一般表述为“设定地震”(scenario earthquake)问题。给定设定地震的位置、设定震源的性质和当地的地下结构,通过对地球介质中弹性波(地震波)的激发和传播过程的模拟,可以定量地对地震引起的强地面运动和可能的地震灾害进行预测。这种预测的结果,可以作为进一步的工程措施和应急管理措施的基础。其中浅层结构如何对地震强地面运动产生放大效应,地震如何造成

“地基失效”的问题,是一个复杂的非线性力学问题,至今仍在研究之中。

随着城市的发展,人工建筑已经逐渐走向地下,因此传统上的“强地面运动”(strong ground motion)的概念,原则上也应该包含地面以下人工建筑所涉及的地球介质的运动<sup>[4]</sup>。地下的人工建筑也可以像沉积层那样影响地震强地面运动的特征。换句话说,可以利用地震波在城市所形成的“光栅”中的“干涉”效应,减轻地震造成的灾害。但对这些现象的物理规律的研究,目前才刚刚开始。

## 2 地震的社会灾害

地震还常常伴随着各类次生灾害,这些灾害以连锁效应(ripple effect)的形式,对社会造成更大的危害。地震之后的应急响应不及时和管理混乱,往往是造成附加的人员伤亡的很重要的原因。地震时发生的人群慌乱,常常可以造成相当大的不必要的伤亡。地震发生时对火源、电气处理不当,是地震之后发生频繁的和大规模的火灾的主要原因。一些地震之后,还会出现天气的急剧变化(例如夏秋季的暴雨或冬春季的降温),这就进一步增加了救灾工作的难度。灾区大规模传染性疾病的防治问题,也是救灾工作中一个十分重要的问题。与地震救灾相关的社会秩序和社会组织,同样是地震应急中需要严重注意的问题。

统计表明,近年来,地震对人类社会的威胁呈现快速上升的趋势<sup>[5]</sup>。这当然不是说经济、科技和社会的发展反而使得人类抵御地震灾害的能力在逐渐下降。从社会灾害的意义上说,这里所说的“威胁的上升”,主要表现在随着社会财富的增加,地震引起的经济损失的总量也在增加。可以理解的是,现代社会中的一个建筑的破坏,其经济损失往往大大地超过传统社会中的一个建筑的破坏,尽管前者往往比后者具有更强的抗震能力。一个传统作坊的破坏和一个现代的化工厂的破坏,对整个社区的威胁程度也不可同日而语。

不过,更需要注意的一个事实是,随着社会的发展,生产和消费的社会化趋势进一步增加,结果是,生产和消费中的任一环节的破坏,往往都会以“连锁反应”的方式影响整个社会。在一个网络化的时代,情况就更是如此。因此从物理学的角度看,地震灾害不再仅限于对某个特定的建筑设施的破坏,而是对整个社会系统的一种冲击。所以不奇怪的是 20

世纪 80 年代后,城市、特别是大城市的防震减灾问题,引起国际学术组织、各国政府和社会的密切关注。上述这些问题在 20 世纪 70 年代以前还不是物理学关注的领域。但近年来物理学在金融、社会等问题中的成功应用,也使这方面的研究开始逐渐向物理学“靠拢”。

### 3 地震的规律性

从全球尺度来看,地震主要分布在一些被称为“地震带”的地区,这些地区通常与现代的或历史上的板块边界相联系。中国处于环太平洋地震带和欧亚地震带的交界部位。中国大陆有记录以来的 7 级以上地震,大都分布在“构造块体”的边界带上(图 1)。因此地震预测的物理学问题,有时也可以表述成这些块体是怎样相互运动的,而这种相互运动又是如何导致地震的问题。

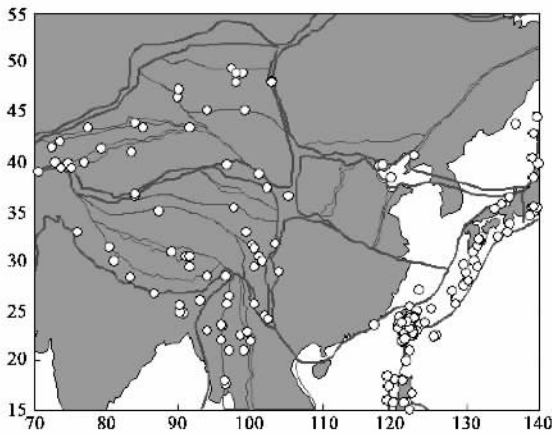


图 1 中国及其周边地区的构造块体与强地震活动<sup>[6]</sup> [图中黑线表示构造块体的边界(带),其中粗线为一级块体边界(带),细线为二级块体边界,圆点为 20 世纪  $M_w$  大于 7 的地震,  $M_w$  是目前普遍采用的一种震级标度(矩震级)]

迄今对地震的发生还不能做到准确的预测<sup>[7]</sup>。目前科学界普遍承认,地震现象是自然界中的一类复杂现象,但现在并不清楚,地震究竟可以看成是地球内部的一种自组织临界现象(SOC),还是一种间歇性的临界现象(intermittent criticality),这两类现象的可预测程度是不同的。但无论如何,明确地指出未来地震的时间范围、空间范围、震级范围、发生概率的“经典”意义上的地震预测,特别是时间尺度小于几个月、空间尺度小于几百千米的地震预测,目前还很难做到<sup>[8]</sup>。不过,在最近结束的亚洲地震委员会(ASC)第五次大会上(2004 年 10 月 18—21 日,

埃里温),日本著名地质学家上田诚也宣称,地震预测问题将在十年内攻克。现实一点说,尽管地震预测作为一个重要的基础科学问题,在地球科学和物理科学的发展中都具有重要意义,但至少目前,将地震预测作为防震减灾工作的一部分,还不具备成熟的条件。

然而,在一些合理的物理假定的前提下,通过考察地震发生的地质、地球物理环境,研究地震发生的规律,在十年至几十年的时间尺度、几百千米至几千千米的空间尺度上,对强地震的发生进行概率性的预测(国际上有时称为 intermediate-term medium-range prediction),仍是可能的。这种预测对于防震减灾的社会准备和工程措施实际上是更为必不可少的。这方面的研究,例如国际理论物理中心(ICTP)支持的研究,通常与非线性物理学在地震问题中的应用联系在一起,因为从地震活动的“图像”中寻找地震发生的规律性,是一个典型的图像动力学(pattern dynamics)问题。而即使完全使用统计的方法,在地震学中观察到的经验性的统计规律,例如地震的震级-频度关系,也需要物理学、特别是非线性物理学的解释。

地震学中的一个假定是,地震的孕育过程往往与地震断层带所承受的应力的增加联系在一起,当逐渐积累起来的应力达到断层的破裂强度时,就发生地震。现代计算技术的应用,已经使地震学家在一定程度上能够模拟地震前后应力场的演化,以探索地震危险性的定量估计的可能性。例如,库仑破裂应力(CFS)增加的地区,常常被认为是今后有可能发生地震的“危险的”地区<sup>[9]</sup>。这实际上是地震学家向地震预测的科学目标进行不懈努力的一个重要的方向。

防震减灾问题是一个非常实际的问题,因此一个原则是,决不能等到所有的科学问题都得到解决之后,再提出工程上的措施,相反,正确的思路应该是,在科学上“懂”多少,在技术上就“用”多少,事实上,这也正是目前普遍采用的技术路线。比如,地震学家知道,在振幅较大的剪切波(地震学中称为 S 波, S 最初来源于 secondary 的说法)到达之前,可以探测到振幅较小的压缩波(地震学中称为 P 波, P 来源于 primary 的说法)。对于距离地震震源几十千米的地方, P 波与 S 波之间的时间差约为几秒的数量级。物理上,这个知识并不复杂,因为关于纵波和横波的认识,早在 19 世纪以前就已经得到,19 世纪末,物理学家曾经假定光波就是在“以太”中传播的

一种横波.但运用这样简单的知识,地震学家建立了地震早期预警(early warning)系统<sup>[10]</sup>,它可以在遭受地震的“突然袭击”的情况下,为重要的工程设施“抢”出尽管只有几秒,但却是十分宝贵的“反应时间”。

地震之后常常伴随着一系列小一些的地震,称为余震(aftershock),我国台湾省称为“后震”。前面的较大地震,称为主震(mainshock)。强余震可以造成更多的破坏和伤亡,并对救灾工作造成威胁。对强余震的发生时间仍不能做到准确预测。但关于余震发生概率的统计规律(大森定律),可用来进行防灾对策的制定;已知主震的地震断层的性质,通过计算地震引起的应力场变化,目前可以在一定程度上定量地预测强余震最可能发生的地点<sup>[11]</sup>。

#### 4 讨论

减轻地震灾害的科学研究包括三个主要环节:地震危险性(hazard)的研究、地震危害(risk)的研究、地震灾害(disaster)的研究。这三个领域都需要物理学的帮助。

地震危险性的研究,就是依据对地震发生的物理规律的了解和对地震发生的环境条件的了解,预测未来地震发生的危险性,并由此预测地震引起的强地面运动的情况。这方面的研究,需要地震活动的观测、地下结构的探测、地形变的观测、地质构造的研究、古地震的研究等多方面的基本资料,但综合这些资料,以给出地震危险性的估计,则需要一个统一的物理模型或统计模型,其中物理模型一般需要大规模的计算作为基础。

图2给出了全球地震危险性评估项目(GSHAP)的一个结果,这种被称为“区划”(zonation)的结果,是地震危险性研究的一类主要“产品”。这类区划一般涉及较大的地域范围,如一省或数省,一个国家/地区或多个国家/地区,甚至全球,而对较小的地域范围,如一个城市或集中若干重要设施的地区,还要进行地震的小区划(micro-zonation)。

地震危害性的研究,就是在地震危险性研究的基础上,通过地震造成的建筑和工程设施的破坏过程的模拟,预测地震可能造成的破坏和由此可能造成的人员伤亡和经济损失。

减轻地震灾害的最重要的措施无疑是进行有效的抗震设计。严格按照抗震设防条例(building code)进行工程设计,是防震减灾的基础。但怎样检测和控制建筑的质量,避免“豆腐渣”工程,特别是

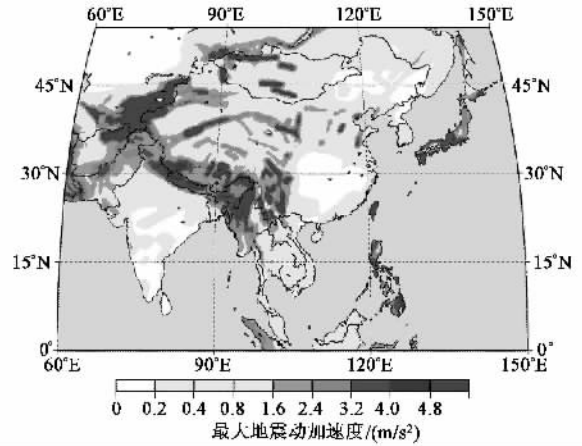


图2 全球地震危险性评估计划(GSHAP)给出的中国及周边地区的地震危险性<sup>[12]</sup>(这里,地震危险性是用当地可能的最大地震动加速度来表示的)

怎样进行已有建筑的安全性的鉴定,是一个复杂的技术问题,也是一个复杂的物理问题,同时也是一个非常实际的问题——我们毕竟不能等到地震发生的时候再来检验遵守抗震设防条例情况。

地震发生时的灾情速报和辅助决策、地震应急的组织系统和技术系统的准备,既是具有实际意义的技术问题,同时也涉及心理学与认知科学、信息科学、系统科学、管理科学等方面的基础科学问题。减轻地震灾害的效果,取决于这些科学问题和技术问题的解决的程度,并且取决于诸多环节中最弱的那个环节,而复杂系统的“行为”和“控制”问题的物理学,是这些研究的一个理论基础。

本文概略地介绍了目前防震减灾工作中的一些重要的科学问题,并讨论了物理学在这些问题的研究中的可能的应用。这里,我们主要是在提出问题,而不是给出问题的解答。有些问题目前也的确没有很好的解答,更不用说最后的解答。值得指出的是,防震减灾中的物理学问题的研究,决不仅仅是已有的物理学知识的简单应用。其中的一些问题,显然与当代物理学研究的一些前沿问题联系在一起。

近年来,笔者曾作为论文评审人,评审过一些物理学家的地震研究的论文,也曾拜读过一些物理学杂志中的地震方面的研究结果。这些工作都是很好的工作,但一个印象是,物理学家对地震问题的兴趣,似乎仍主要局限于地震预测问题。地震预测问题当然是一个重要的科学问题,但却并不是防震减灾问题的全部。事实上,防震减灾工作中“用得着”物理学家的地方实在是太多太多。笔者希望本文能在这方面,改变一下目前物理学家对地震问题的印象,

从而为推进地震科学和物理科学的交叉,起到某种“桥梁”的作用.

致谢 作者得到陈运泰院士的指导. 承蒙专家和领导重视. 本文部分内容被国家发改委“十一五”重大科学问题咨询报告收录. 特此感谢.

### 参 考 文 献

[ 1 ] 参见 Bull. Seism. Soc. Amer. ,2002 91. 5(台湾集集大地震专辑)

[ 2 ] Davis P M *et al.* Science 2000 ,289 :1746

[ 3 ] Ma K F *et al.* Geophys. Res. Lett. ,2003 ,30 :5 ,doi :10.1029/2002GL015380

[ 4 ] 谢礼立. 2003 ,[http://www.icce.ac.cn/shr\\_iaspei/newsletters/shr\\_enl\\_2003/enl\\_200310.htm](http://www.icce.ac.cn/shr_iaspei/newsletters/shr_enl_2003/enl_200310.htm)

[ 5 ] 丁石孙主编. 城市灾害管理. 群言出版社,2004[ Ding S S ed. The Management of Urban Disasters. Beijing :Quyan Press 2004( in Chinese )]

[ 6 ] 《中国科学(D辑)》,第33卷增刊,2003年4月出版[ Science in China ,Series D 2003 33( in Chinese )]

[ 7 ] 1999年英国《自然》杂志网上版曾组织关于地震预测的可能性问题的争论,见:[http://www.nature.com/nature/debates/earthquake/equake\\_frameset.html](http://www.nature.com/nature/debates/earthquake/equake_frameset.html)

[ 8 ] 1996年美国国家科学院曾组织《院刊》专辑,讨论地震预测问题,参阅 <http://books.nap.edu/books/0309058376/html/index.html>

[ 9 ] 中国、澳大利亚、日本、美国在 APEC 框架下有一个地震模拟方面的多边合作项目,见 [http://www.aces.org.au/ACES-2002-workshop/online\\_proc.html](http://www.aces.org.au/ACES-2002-workshop/online_proc.html),其中详细介绍了相关思路

[ 10 ] <http://equakealert.com/>

[ 11 ] Harris R A. J. Geophys. Res. ,1998 103 24347

[ 12 ] <http://seismo.ethz.ch/gshap/eastasia/asiafin.gif>

作者简介 中国科学院研究生院地球科学学院教授,中国地震局地球物理研究所所长,国际地震学与地球内部物理学协会( IASPEI )副主席,IASPEI 地震危险性、地震危害与强地面运动委员会( SHR )主席.



· 物理新闻和动态 ·

## 对第六感官的认知与调节

科学家们一向认为,人体在运动与平衡方面存在着第六感官,这是除了平时所指的嗅觉、触觉、听觉、视觉和味觉以外的另一种感觉. 最近美国加州理工学院的 T. Squires 教授认为,第六感官是人类可以好好调节的一个器官. 他研究了人类在进化过程中的自然选择规律,发现其中起特殊作用的是处于前庭区的内耳半规管( semicircular canals 简称为 SCC ). 它是由一组在三维空间内相互垂直的并充满着流体的管道所形成的小室. 它位于脊椎动物的内耳里,它是一个控制平衡的器官. SCC 的结构基本上是一个圆环形,其内半径约为 0.2mm,外半径将近 3mm. 圆环被隔膜所分割,相互间不联通,这种隔膜被称为吸盘. 隔膜表面布满着细小的触毛,它的作用是感受流体在管道中流动时的晃动、加速、旋转时的变化,同时也能感受当 SCC 旋转到另一方向时流体在管道内瞬间的偏离. 流体的变动使吸盘上的触毛发生偏转. 这时就能触发一个神经信号到脑部和控制眼睛的肌肉处,这就是为什么在作某些运动时,人们会感到头昏眼花的原因.

Squires 教授还发现一个重要的现象,即老鼠、鲸和人类的内耳半规管组织的大小几乎相同,对于人类来说,成年人与在母体内孕育了 14 周的胎儿有着相同大小的内耳半规管. 这是什么原因呢? 这个尺寸的器官是不是具有最佳的传感功能呢? Squires 教授为了能解答这些问题,他在实验中对 4 个物理参数进行了调节,它们是 SCC 的内半径、外半径、吸盘的厚度和重量. 实验表明,最大的管道灵敏度的确发生在脊椎动物所具有的尺寸上. 这一系列的研究有助于我们了解产生各种头昏眼花的形式,例如高空眩晕以及有时斜着头看天花板时的眼花等. 也有助于我们了解某些有关视觉方面的特性.

由于 SCC 信号紧密地影响着眼睛周边的肌肉,所以有些情况可以实现,有些却不可能. 例如你可以利用转动你的头去阅读一张固定的报纸,但你却无法固定你的头去读出一张由你朋友拿在手中不断转动的报纸. 利用 SCC 控制的眼睛反馈效应还可以解释为什么家用摄像机可以将运动的画面记录下来,但在随后的编辑阶段却不能清晰地被人们看清,这是因为这时神经反馈系统并没有参与工作.

( 云中客 摘自 Physical Review Letters 5 November 2004 )