

## 谈谈地震预警

□ 嵇少丞

2017年8月8日四川省阿坝州九寨沟6.5级地震发生之后,网上曾有这样的新闻报道:“某地震预警系统在此次地震中,提前71秒通过手机及专用终端为成都市发出预警信息,提前40秒通过汶川县电视台发出预警,提前19秒为甘肃陇南市发出预警。算上这次,该系统已经成功预警38次破坏性地震”。

地震预警,英文叫做“Earthquake Early Warning”,日语叫“紧急地震速报”。对于不了解地震预警原理的人来说,上述报道的确振奋人心,甚至还会把地震预警误解成地震预报,其实,二者是完全不同的两回事。

地震预报系指是对未来破坏性地震发生的具体时间、地点和震级的预测。换句话说,地震预报是在地震发生之前做出的,而地震预警则是在地震已经发生了之后对地震波到达各地具体时间的提示。尽管全球科学家一直致力于探索地震形成机制、提高地震预测能力的科学实验研究,但在目前的科学技术条件,人类尚不能对地震发生的地点、震级特别是具体时间进行准确预报。目前世界各地的地震预警系统都是利用电磁波和地震波的走时差,力争提前几秒到几十秒预报地震波到达震中周围各地的具体时间,希望利用这个短短的时间差能让大多数人走出房屋,以图最大限度保护生命。这种紧急地震速报还可以让火车司机将火车减速、避开桥梁与隧道,工人将工厂的生产线停下,核电站停止发电、外科医生暂停手术等。

在岩石介质中,地震产生的纵波的传播速度大于横波的传播速度,纵横波速度之比总是大于 $1.414(\sqrt{2})$ 。对于常见的许多地壳岩石,纵横波速度之比为 $1.732(\sqrt{3})$ 。纵横波速度之比的具体数值取决于岩石的泊松比,泊松比越大,纵横波速度之比愈大。由于横波的振幅比

纵波大得多,许多建筑物都是在横波扫来之时摧毁的。所以,了解横波到达的时间尤为重要。

地震发生时,首先破裂的那个点(震源)发出的纵波首先到达震中,若震中的地面正好有一台地震仪,它就会记录首波(纵波)到达的最短时间。在大多数情况下,地震仪基本都不在震中,而是在距离震中几十千米甚至几百千米的地方,纵波需要一定的传播时间才能到达地震仪,使其到达时间被地震仪记录下来。2008年5月12日发生的汶川地震的震中在映秀镇,那里正好有四川省地震局的一个地震台,可惜该地震台并没有上传数据,原因是地震台的房子被震倒了,砸坏了地震仪。

利用震中附近至少两台或多台地震仪记录到的走时数据,地震预警系统中心计算机可以迅速计算出震级、特别是震中(最好是震源)的位置,然后根据经验公式计算出纵横波到达各地的时间,把相关信息自动发送到电台网、电视台网与手机网络。例如,2017年8月8日发生的九寨沟地震的震源深度是12 km,取地壳平均纵波的速度 $6.00 \text{ km/s}$ ,岩石的泊松比 $0.25$ ,即横波速度为 $3.46 \text{ km/s}$ 。从震源出发,纵波需要 $3.36 \text{ s}$ 、横波需要 $5.83 \text{ s}$ 才能到达距离震中 $21 \text{ km}$ 的某乡镇,纵横波之间的走时差为 $2.47 \text{ s}$ 。但是,每个地震台站至少需要记录持续 $5 \text{ s}$ 的振动才能断定是一次发生的地震,然后计算机再进行信号数据处理,将预警信息发送出去。一般来说,待到人们收到预警信息,地震发生已经过了 $8\sim 9 \text{ s}$ 了,这就是地震预警网的响应时间,该时间决定地震预警系统的盲区范围。在盲区范围内,破坏性地震波在人们收到地震预警之前就已经到达。若震中附近 $100 \text{ km}$ 没有地震台站,待纵波传到第一个地震台站已经过了 $17\sim 18 \text{ s}$ 了。即使

每 $30 \text{ km}$ 有一个地震台,地震预警的“盲区半径为 $21 \text{ km}$ ”也是不可能的,真正的盲区半径至少为 $50 \text{ km}$ 。

对于一个 $6.5$ 矩震级的地震,走滑断层的地表破裂带长度也就 $16 \text{ km}$ 左右。烈度大于等于 $7$ 度(大多数入惊逃户外,骑自行车的人有感觉,房子墙体出现破坏与开裂)的地震的破坏性地带也就是 $25\sim 30 \text{ km}$ 范围,对于这个极震区内的居民最需要逃生,但理论与技术上几乎不可能在地震波到来之前让当地居民收到预警信息。而居住在距离震中 $50\sim 300 \text{ km}$ (例如,成都离九寨沟直线距离约 $300 \text{ km}$ )这个范围内的人们没有必要紧迫逃生,却接收到了预警,只能是虚惊一场。况且,地震预警在目前条件下误报概率还相当高,因为太强调“快速响应”,一快就不可避免会出现错误。总之,对于 $6.5\sim 7.0$ 矩震级以下地震,预警的作用并不明显,因为地震预警的盲区范围比地震烈度 $7$ 度及其以上高破坏区的规模还大得多。此外,预警也无需发给预估烈度小于 $5.0$ 的地方,因为那些地区的居民绝无生命危险。

相反,对于2008年5月12日发生的 $8.0$ 级汶川地震,地震预警的作用却是非常明显的,因为震级大,能量释放多,波及范围广。打个比方,地震像撕布,波源是沿着震破裂带边走边撕。断裂带越长,撕的时间越长,地震持续时间越长,震级越高。有人误以为一次地震只有一个极震区,假说地震的能量从一个点向外释放,极震区的几何中心就是地震的宏观震中。所以,汶川地震刚过,有人把地震烈度的分布画成一系列的同心圆,以为越向外地震烈度越低(有的地震预警也隐含这样的概念),这个错误认识客观上影响当地决策者对灾区总体的认识。例如, $5\cdot 12$ 大地震后救援的人员在开始时均往映秀集结,救

灾物资和大型工具也都运往映秀附近,而对北川、青川、乃至甘肃文县的地震灾情估计严重不足,一定程度上影响了抗震救灾的效率和效果。事实上,汶川地震的等烈度呈长椭圆形,长轴平行于龙门山断裂,沿龙门山中央断裂贯穿的城镇和村庄才是极震区——真正的重灾区,一条长近250 km的条带区域,那里的房屋倒塌在70%~80%以上。地震断裂带从西南的映秀走向东北的青川用了近75秒才完成其撕裂过程,这75秒龙门山断裂带恶狠狠地撕裂,连续不断地发出恐怖的吼声——地震波。若那时就有地震预警系统,四川省北川、青川与甘肃文县等极震区的居民完全可以在地震到来之前有足够的时间走出楼房,免遭掩埋废墟之灾。

影响地震预警的具体效果的因素除了上述的震级与距离之外,还有如下几个因素:

(1)震源深度。正如康熙皇帝67岁那年(即1721年)所说:“深则震动虽微,而所及者广;浅则震动虽大,而所及者近。广者千里而遥,近者百十里而止”。由太平洋板块在日本海沟向西深俯冲形成的深源(>300 km)地震在中国仅分布在吉林省珲春-汪清一带,这些深源地震对地面工程建筑破坏性不大,所以无需预警。在中国大陆内部发生的地震基本上都属于浅源地震(<60~70 km),绝大多数破坏性地震的震源深度为15~25 km。

(2)地震破坏程度与地壳-地幔的热结构有很大关系。地壳-地幔越热或含水量多(例如,滇西),地震波越是衰减得厉害,地震波的振幅在短距离内衰减很多,地震波速也随之减小。而加拿大地盾、华北地台与扬子地台,地壳-地幔的地热梯度低,有利于地震传播。

(3)受矿物晶格优选定向及其裂隙优选定向的影响。地震波在地壳岩石中有可能是各向异性的,在不同方向上具有不同的速度。目前的预警系统假设设定岩石介质是各向同性的,不可避免会出现很大的误差。

(4)地震的破坏程度与地形地貌有

关。地势起伏大、山坡陡峭的山区(例如,川西南、滇西),地震必然会造成山崩、滑坡、塌方、泥石流等次生地质灾害,加重震害。

(5)地震的破坏程度与地下地质结构特别是地下水位有关。若城镇建在松散沉积物包括古河道、古湖泊相的沉积物、流沙土及人工回填土之上,加之地下水位高,沙土液化势必造成房屋倾斜、破坏、倒塌。这类松散沉积物空隙度大,内含饱和水,具触变性。在静态情况下,水饱和的沉积物尚具有一定的稳定性,但在动态情况下,例如地震波晃动下,这种水饱和的松散沉积物瞬间会失去稳定性,呈现出液态的物理性质,即发生沙土液化,使得坐落其上的建筑物在流沙中不均匀下沉,造成建筑物倾覆而彻底摧毁。这就是建筑学上所说的场地效应和地基失效。四川省曲山镇就是坐落在松散沉积物之上的北川县老县城,这也是这座老县城遭到毁灭性破坏的重要原因之一。无数事实证明,直接建在坚固基岩上的房屋更耐震。唐山地震中唯一仅存的两座古庙,就是因建在坚固基岩上而得以大难不毁。另外,一些房屋坐落在河岸边,地震振动使地基连同房屋倾覆或坠落河底。所以,灾后重建中住房选址一定要远离河岸和不稳定的边坡。这方面,国外也有不少经验教训。1985年9月19日墨西哥海岸连续发生8.1级和7.6级两次强烈地震,造成西部太平洋沿岸4个州和离震中约400 km的首都墨西哥城近万幢高层楼房倒塌,近4万人死亡。墨西哥城的老城和商业区的主要办公楼及宾馆全部倒塌。震后调查表明,墨西哥城是建造在古湖泊相沉积之上,地面震动导致地基失效进而建筑物倒塌。1989年10月17日美国加州洛玛普里艾塔发生7.1级地震,由于震区的建筑物总体抗震能力较好,建筑物破坏并不严重,但在靠近旧金山湾附近,由于多是人工回填土,建筑物多遭破坏,包括多座高速公路立交桥坍塌。2001年1月26日印度古吉拉特邦发生7.9级强烈地震,导致16480人死亡,约15万人受伤。这次地震几乎摧毁了该邦首府库奇

镇所有的建筑物,因库奇镇正好建筑在印度河的古河道上。

(6)地震的破坏程度与当地建筑质量有关,与其搞地震预警,不如搞抗震设防、提高建筑质量。同样是一次7级左右的地震,在美国、日本等发达国家,一般死亡人数较少,因为他们把抗震设防落实到实际行动中,做到建筑设计有人审,建筑材料有保证,施工质量有核查,绝大多数建筑甚至毫发无损;而在经济落后、人口稠密的发展中国家或豆腐渣工程普遍的国家,甚至会导致几百甚至几千人、上万人死亡。由此可见,同一个震级的地震发生在不同的国家其破坏程度是非常不一样的。自20世纪至今,中国占全球因地震死亡总人数的50%以上。同一时段,全球共发生造成20万人以上死亡的大地震有两次,不幸的是这两次地震都发生在中国:一次是1920年宁夏海原的8.5级特大地震,造成23.5万人死亡,另一次是1976年的河北唐山7.8级地震,造成24.4万人死亡。2008年的汶川8.0级特大地震又造成近9万人死亡。中国的领土面积(960万km<sup>2</sup>)占全球陆地总面积(1.5亿km<sup>2</sup>)的6.7%,中国领土上发生的地震约占全球陆地地震的33%,但为什么因地震造成的死亡人数却占全球地震死亡人数的50%以上?造成这样状况的主要原因之一,是长期以来人们对建筑物抗震设防缺少应有的重视和应该改善的有力措施。

小结:离震中太近(<50~60 km,即地震预警盲区,但全部地震伤亡者几乎都来自这个区内),在破坏性地震波到来之前人们尚未收到预警;离震中太远(>100 km)无需收到地震预警,因为地震烈度达不到破坏建筑的程度,地震预警反而会干扰居民正常的工作与生活。对于6.5级以下的中等地震,地震预警用处不大,但对2008年汶川地震那样的8.0级地震,地震预警的效果会特别显著。解决地震灾害问题的根本手段是实施抗震设防、提高建筑质量、消除豆腐渣工程。

□ 作者系加拿大蒙特利尔工学院教授

通讯地址: Département des Génies Civil, Géologique et des Mines, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, H3C 3A7, Canada