

考虑发震断层相互作用的地震危险性 分析讨论*

郭 安 宁

(国家地震局兰州地震研究所)

一、前 言

现用的地震危险性分析方法是由考纳尔 (C.A. Cornell, 1968) 和洪华生 (A. Der Kiureghian and H—S Ang, 1977) 创立了基本思路的^{[1][2]}, 它被应用到现在已经十几年了。这十几年来地震学已经有了一定的发展, 因之原先的地震危险性分析模式所依赖的地震学基础显然需要用新的地震学基础加以改进, 这就是作者现在写这篇论文的主要目的。考纳尔和洪华生的地震危险性分析模式包括三个步骤: 一、在确定了建设场地之后, 首先确定能对该场地发生地震影响的潜在震源, 即划分各种条带; 二、以此潜在震源为底本 (条、带) 确定它们能对场地引起某一地震动的地震年平均发生率, 并进而按概率公式得出其相应的地震发生概率; 三、把各潜在震源对场地的影响概率相加, 并求出建设场地所要求的某时段内超过某一给定值的概率, 即超越概率。其具体含义是, 假如今后50年建设地区定为7度 (或用相应的加速度值), 其超越概率为10%, 这就意味着今后50年内有90%的把握不发生高于7度的地震, 或超过7度的地震的可能性只有10%。在这个计算步骤中, 对地震的发生过程作了如下的基本假定: 1. 假定在一潜在震源区、带的某一小区段内, 历史上发生的和今后发生的地震不会改变其周围的应力场分布和应力积累条件, 即发生过这个地震与未发生过这个地震其对周围今后发生地震毫无影响。2. 在给定的潜在震源区中, 今后发生地震的地方, 将在其中任一点都有可能发生, 该点包括原有历史强震的地段及强震的周围, 因而多大的地震都会在原地重复, 且多点的机会相同。这二个假定虽未在考纳尔和洪华生的危险性分析模式中明确地提出, 但实际上其中是包含了这两个假定的。在本文的研究中, 我们对上述假定进行了改进。所得出的一些结果是: 1. 对于相近的两个断层来说, 当其中一个在历史上发生过强震或今后发生强地震后会改变其周围的应力场, 它会对另一断层上的继它之后的地震发生有影响; 另外还给出了这个影响场的范围大小以及在该影响场内今后地震发生的震级上限分布。2. 在潜在震源内的某一区段中, 今后大地震的发生将不遵从完全可重复的假设, 已发生大震的地段, 不仅自己难以重复同类震级的地震, 而且把原来发震断层截段后, 剩余的地段也难以发生原发震断层所相应的大震了。

这两条就是本文所要研究的范畴。在这个范畴中, 我们将利用地震学中新近发展的有关大震重复性及有关减震问题的研究作为我们研究的基础。

* 本文为1988年地震学基金会资助课题

二、发震断层相互作用的基本内容

在某一作为潜在震源的断层条带上, 如其中一段有大地震发生, 则对该潜在震源今后的发震影响可概括为两个方面。

1. 同一断层内某段发生地震造成的截段性 在一个作为潜在震源的断层条带中, 地震的发生本身就是应力的释放, 在释放应力的主要地段其后要经过很长一段时间才能再积累出足够的应力发生地震, 但相邻别的地段则可能隔不长时间就会发震。这样就出现了潜在震源区不同段上今后发震的不等重复性。如图 1 所示, 在断层 AB 上一有 CD 区段发生了某种震级的地震, 这就意味着 CD 段释放了能量, 其结果就是很长一段时间内不会再发生地震。



图 1 长的发震断层内某段发震的情况

这个段的长度与震级的对应关系可表达为:

$$M = 3.3 + 2.1 \log CD. \quad (1)$$

式中 CD 以公里为单位。对于整个断层而言并未排除再发生大震的条件, 但由于在其 CD 段上已释放了能量, 今后发生的地震应在 CD 段以外的地段, 而不是今后整个 AB 发震断层上各段发震的可能性相同, 这就是空间的不均匀性, 它不像原来的地震危险性分析法中认为在该断层 AB 上以后发震的机率在每一点上都是一样的, 即均匀分布。另外由于 AB 段被分割为 AC 和 BD 两小段, 今后它们相应发生的地震也就比 AB 段发生的地震要小了。我们称以上发震断层 AB 上 CD 段内的减震为本减作用, 称被 CD 段分隔和限制了的小段 AC 和 DB 今后不可能导致 AB 整段发震的减震为限减作用。

2. 地震发生对附近断层的减震性 当某处发生了大地震和释放了剪切应变能后, 不仅本身的危险性大大减低了, 而且与其平行的另一发震断层由于其应力场的改变也会导致其危险性的降低, 其物理意义如图 2 所示。在图 2 中, AB 和 CD 是两组相互平行的断层, 图 2 a 为两断层均未发生剪切应变; 图 2 b 为剪切应变正在行进之中, 图 2 c 为 CD 段发震后 AB 段断层上的剪切应变相应有所减小, 因而其地震危险性也相应降低了。这就是所谓的“平行一同旋一减震”。这个被减的距离 R 以下式表示^[3]:

$$\log R = 0.48M - 1.87 \quad (2)$$

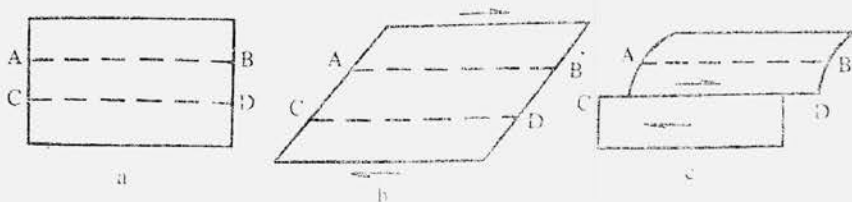


图 2 平行断层发震的相互作用

a. 未发生弹性变形, b. 正发生弹性剪切变形, c. 沿 CD 发生错动 (发震)

式中 R 以公里为单位。这个公式与由弹性位错理论求出的在与断层走向垂直方向上大约

$\frac{2}{3}L$ 处的剪切应力的增加不矛盾, 因为:

$$R < \frac{2}{3}L \quad (3)$$

式中 L 是震级为 M 的地震所相应的震源断层长度,即:

$$M = 3.3 + 2.1 \log L \text{ (公里)} \quad (4)$$

由此可得到

$$R < \frac{2}{3} 10^{(0.48M - 1.57)} \quad (5)$$

另外,断层发震之间的相互影响还有在空间上垂直组合的情况,如图3所示。

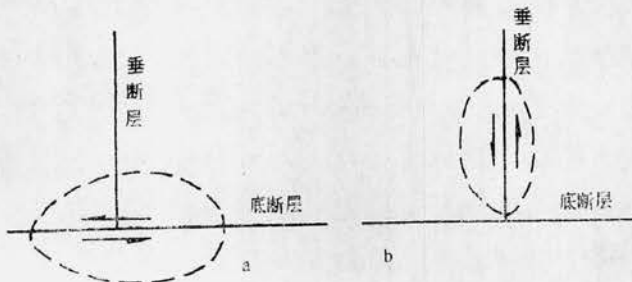


图3 断层垂直组合的发震影响

a. 底断层发震对垂断层的减震作用

b. 垂断层发震时对底断层的促震作用

在图3a中,当底断层发生大震后,垂断层上被虚线所截范围内也释放了剪切应变,因之这一范围就减震了。此所谓“底震—垂减”。虚线所截的长度相当于(3)式中的 R 。当垂断层发震后,底断层应力并不减小,而且由于垂断层大震时在底断层上有一张力作用,故有促使底断层发震的作用,故称“垂震—底继”。

以上是我们从原理上对断层在发震上的相互作用所作的介绍和讨论。其中的减震作用因是针对已发震的断层之外的断层讲的,故可称为“外减作用”。下面我们将从实际资料和数据上进行讨论,以便在地震危险性分析中能够具体应用。

三、实际数据的讨论

我国的地质构造和应力分布情况是很复杂的,所以各地的大震活动情况也很复杂,对此情况,我们统计分两种情况,一种是一般情况的讨论,一种是大震特别活跃地区的讨论。后者虽然事例很少,但却与一般性统计所得结果具有反对意见。在本文中,我们将从物理分析调和它们之间的矛盾。在我国有以下一些地区的震例是很特殊的,即山西临汾地区、青海都兰地区,四川鲜水河地区,广东南澳地区和西藏当雄地区。在这些地区表现为大震重复周期较短,不符合一般规律,但实际情况亦不是矛盾非常大,下面我们首先讨论它们的情况。

1. 山西临汾地区 以前认为临汾地区1303年曾发生过8级地震,1695年曾发生8级大震(有人定7.5级),它们的重复时间间隔这样短,这使得广大地区所得地震重复时间较长的结论“欲用有虑”,但按山西地震局武烈的研究^[4],这两个大震的极震区长轴方向还是有区别的,如图4所示,由此可知,它们符合前边图3b中“垂震——底继”的原则。即虽然临汾地区受到两次8级大震的袭击,但震源不是一回事,是各自分别发震的,因之不可认为它是同一震源区重复时间间隔较短的典型事例。这一点在地震危险性分析中可以具体寻找发震断层来加以考虑。

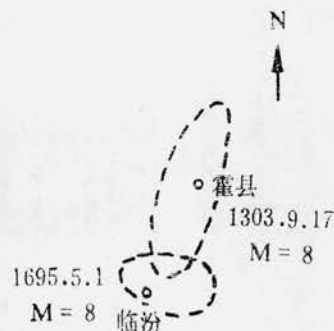


图4 1303年和1695年大震的极震区走向

2. 西藏当雄地区 该地区1951年曾发生8级地震, 1952年又发生了7.5级地震。由于一般全国震中分布图上用圆圈表示震中, 所以把它们放在一起了, 似乎这是大震重复性时间特短的事例, 但按文献[5]的研究, 上述两次大地震的极震区走向并不相同, 如图5所示, 这是符合前面图3b中的“垂震—底继”原则的, 它们是分别发震的, 不是同一震源的重复发震。当它们分别释放能量后今后何时再重复发震, 其时间可能很长。

3. 四川炉霍—道孚地区 该地区1923年发生过 $7\frac{1}{4}$ 级地震, 1973年又发生7.5级地震, 1981年又发生6.9级地震, 如图6所示。由此图可以看出, 它们的极震区有部分相重, 但大部分极震区并不相重, 这是与图1所述的道理不矛盾的。即它们不是原震源区的重复, 而是分别发震。值得指出的是为什么鲜水河地区大震如此活跃? 这可能与平推运动的鲜水河断层在其东南端叠加有贡嘎山垂直运动有关(图7)。这个垂直运动可牵拉鲜水河的平推运动, 因之平推运动特强, 故大震活动频繁。在全国广大地区, 因不具备这种特强的垂直运动叠加, 故按一般时间间隔较长的地震重复性情况考虑。



图5 西藏1951年和1952年当雄大震的极震区走向



图6 炉霍、道孚三次大震的Ⅷ度区等震线

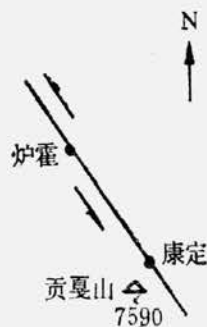


图7 炉霍地区走滑断层运动与贡嘎山垂直运动叠加

4. 青海都兰地区 这个地区是指都兰县城西南的阿兰湖和托索湖地区。该地区1937年发生过 $7\frac{1}{2}$ 级地震, 1963年发生了7级地震, 1971年又发生了6.8级地震。这种特别活跃的地区其构造运动情况与鲜水河地区相同, 即在阿兰湖与托索湖平推断层的东南部有强烈隆起的阿尼玛卿山峰地区(图8)。这种隆起的水平牵拉作用叠加在阿兰湖—托索湖平推断层上, 故剪切应变能积累较快, 故而大震较为活跃。在全国广大地区, 这种情况不具备, 故都兰地区的地震重复性作特殊情况考虑。



图8 都兰地区走滑运动与垂直运动的叠加

5. 广东南澳地区 该地区1600年曾发生过7级地震, 1918年又发生过 $7\frac{1}{4}$ 级地震, 其重复时间间隔只有300余年。这也是较短的。但这里靠海, 其极震区的组合情况不明, 且最近谢毓寿先生认为1600年地震只有6.7级, 这样南澳地区的重复性就不是7级以上大震的重复了。当然在我国台湾东部大震重复性极高, 但因那里有特殊的发展条件, 它与中国大陆上不同, 所以在本文中不予讨论。

所谓一般性统计就是在全国广大地区皆实用的统计。这方面的统计分两种情况, 一种是7级以上大震发生后其震源在地面上的投影区内再发生地震的情况, 另一种是7级以上大震发生后其附近被减震的情况。

1. 已发大震区自身减震的情况

(1) 根据我们对千余年来的地震资料的统计, 得到以下的结果: 在华北、东北、东南以及西北和西南广大地区, 在更大多数的情况, 7级和7级以上大震区未见有重复发生7级和7级以上大震的。这就是说7级以上大震在震源区重复的时间间隔很长。

(2) 在中国广大地区, 在历史上发生过7级和7级以上的大震地区内, 在1000年内可以重复发生6—6.5级地震, 但其比例不大。

(3) 在发生过6—6.5级地震的地区, 不能绝对排除在以后的几百年内再发生7级以上大震的可能性, 但这种情况占有所有6—6.5级地震的很少部份。对于已发生过6—6.5级地震的地区判断今后是否还有更大地震发生的问题, 还要看它是否属于强震可能连片的背景小区而定。例如据我国长期历史资料证明有些省份根本不可能发生强震, 这就不必考虑在6—6.5级地震区再发生更大地震的问题。

2. 7级以上地震对侧旁的减震作用

根据统计这种减震距离基本上符合(3)式的结果, 即在减震区内不能再发生7级以上地震, 但仍可发生6—6.5级地震, 不过所占比例不大, 减震时间尺度大都在千年以上。

四、在危险性分析模式中的应用

在原来考纳尔和洪华生的地震危险性分析模式中, 震级上限是一个很重要的量。这个量在地震危险性分析中有以下的体现^[6]:

1. 震级M的概率分布函数中有震级上限 M_u , 即:

$$F_M(M) = \frac{1 - \exp[-\beta(M - M_0)]}{1 - \exp[-\beta(M_u - M_0)]}, \quad M_0 \leq M \leq M_u \quad (6)$$

$$\ln N(M) = \alpha - \beta M. \quad (7)$$

式中 $N(M)$ 为某种震级地震的数目, 2为地震活动水平, M_0 为下限地震震级, 一般取4级。

2. 震级M的概率密度函数中有震级上限 M_u , 即:

$$f_M(M) = \frac{\beta \exp[-\beta(M - M_0)]}{1 - \exp[-\beta(M_u - M_0)]}, \quad M_0 \leq M \leq M_u \quad (8)$$

3. 在计算场地一年内由各潜在震源区对它造成的超过某种烈度的全概率公式中有震级上限 M_u , 即

$$P(I > I') \approx \sum_{i=1}^N \int_{M_0}^{M_u} P(I > I' | E_{i,M}) f_M(M) dM \nu_i \quad (9)$$

式中的 N 是对场地有影响的潜在震源区的数目; $P(I > I' | E_{i,M})$ 表示第 i 个潜在震源区发生 M 级的地震其影响场地烈度 $I \geq I'$ 的概率; ν_i 是第 i 个潜在震源区发生 $M \geq M_0$ 的地震的年平均发生率。

由 (6)、(8) 和 (9) 式可知, 震级上限对地震危险性分析是很重要的一个量。本文对考纳尔和洪华生模式的修正主要是在震级上限的判定上修正。归纳前边所述, 有以下几点:

(1) 在原模式中, 对图 1 中的孕震断层 AB 来说, 其上各点今后发震的概率相等。我们的修正是 CD 段已发生过地震了, 它和未发生过地震的 AC 和 DB 段在今后发震的概率是不相同的。另外原模式中是用 AB 段全长求震级上限, 我们则认为由于 CD 段已发生地震, 则今后不存在与 AB 段全长相应的震级上限, 而只存在与 AC 和 DB 相应的震级上限。这个上限已比 AB 全长所相应的震级小了。

(2) 在原模式中, 对于图 2 中的孕震断层 AB 和 CD 是分别求其震级上限的。我们认为如果 AB 上发生了大震 (例如 7 级) 则 CD 尽管按长度也可发生 7 级大震, 但已被减震了, 今后只能发生 6—6.5 级地震。这就是说今后 CD 的震级上限不能再定 7 级了, 而只能定成 6—6.5 级。

(3) 在原模式中, 对于图 3 中的垂断层和底断层是分别按其断层长度计算未来的震级上限的 (例如 7 级)。我们的修正意见是当底断层发震后垂断层就要减震, 被减的范围内今后只能发生 6—6.5 级地震, 剩下未减的地段因段长已变小, 所以其今后的震级上限也相应变小了。对于图 3b 来说, 当垂断层发震后, 底断层虽未被减震, 但其发震的时间提前了, 这就会影响今后某时段中发震的概率。

根据以上所述, 当我们遇到一个潜在震源断层时, 我们不能简单的按其地质指标分段而求其今后的震级上限。我们要做以下的分析。一个是看其内某段是否已发生过地震, 从而造成分段现象 (本文称其为限减), 而已发震地段今后发震的概率也减小了 (本文称其为本减)。另外还要进一步分析附近断层是否已发生过大震, 它们对我们所讨论的断层是否有减震 (本文称其为外减) 和促震作用。

对于每一个潜在震源带, 经过上述三次处理, 即外减、本减、限减分析之后就可以依照洪华生、考纳尔模型进行地震危险性分析计算了。还应指出, 当图 1 中的 AB 被分割成 AC 和 CD 两段后, 其各端距场地的方位和距离也变了, 这在由震级和发震断层位置换算烈度时情况就不同了。原来的地震危险性分析法假定: 某震源对场地的影响烈度取决于地震的震级大小, 也取决于场地到断层破裂的最短距离。

总之根据以上所述, 从减震原则考虑的震级上限问题对地震危险性分析法影响很大, 今后应进一步研究。再者还有原方法所圈定的潜在震源区、带被分割后其空间位置的变化也对场地烈度有影响。另外由“垂震底继”的现象看, 它还会影响大震的发生时间, 而不是原地震危险性分析法中的时间分布。对于这些问题都应进一步考虑。

参 考 文 献

- [1] C. A. Cornell, Engineering seismic risk analysis, BSSA, Vol. 58, PP.1583—1606, 1968.
- [2] A. Der. Kiureghian and A. H—S. Aeg, A fault rupture model for seismic risk analysis, BSSA, Vol. 67, No. 4, PP. 1173—1194, 1977
- [3] Guo Anning, Discussion on problem of earthquake reduction, Northwestern Seismological Journal, Vol. 11, No. 2, 1989.
- [4] 武烈, 洪洞和临汾 8 级地震的闭锁结构及发震构造, 地震研究, Vol. 8, No. 1, 1985.
- [5] 西藏自治区科学技术委员会, 国家地震局监测司, 西藏察隅当雄大地震资料图片集, 成都地图出版社, 1989.

DISCUSSION AND ANALYSES ON SEISMIC RISK CONSIDERING
INTERACTION BETWEEN EARTHQUAKE FAULTS

Guo Anning

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Gansu, China)