

# 内陆直下型地震的发生与断层的关系 ——日本兵库县南部 7.2 级地震的启示\*

大内徽<sup>1)</sup> 黄清华<sup>2)</sup>

1) 日本神户 657 神户大学都市安全研究中心

2) 日本大阪 560 大阪大学自然科学研究院地球和空间科学系

**摘要** 讨论了与 1995 年 1 月 17 日日本兵库县南部 7.2 级地震相应的余震及灾害的分布、内陆直下型地震的发生与断层的关系及强震动等基本特征。地表断层系同地下断层系的构造可能存在着较大的差异,地震不一定受既存活断层系(地表断层系)构造活动的制约,强震动域不与震源断层位置直接相对应,而多出现于稍偏离断层两端的区域或断层单侧稍远处的区域内。对强震动的机理也进行了一些探索性的讨论。

**关键词** 内陆直下型地震 断层 震害 强震动

## 引言

1995 年 1 月 17 日日本兵库县南部发生的 7.2 级地震是一种典型的内陆直下型地震。这次大地震不仅打破了日本关西地区无强震的传统观点,也打破了日本抗震安全的神话,同时还指出了现今地震学依旧面临着不少有待解决的问题。迄今为止,对于该地震已进行了一系列的现场调查和综合研究,取得了一些宝贵的经验,但同时也有许多观测事实难以简单地用现代地震学理论予以解释。因此,有必要对现有的有关研究进行系统分析,讨论该地震给我们带来的一些有益的启示,诸如内陆直下型地震的发生与断层的关系、强震动的特征及机制等,为建立更能符合观测事实的孕震物理模式提供必要的依据。本研究对防震减灾工作具有十分重要的意义。

## 1 余震及震灾的分布

### 1.1 余震分布

对应本次兵库县南部 7.2 级地震,在神户方面,既存活断层系并未出现明显的活动,也未生成新的地震断层,余震分布沿现有的活断层系一直延伸至宝塚而在淡路岛方面,野岛断层为发震断层,对应的余震多分布于野岛断层的西侧。实际上,这种余震主要分布于断层单侧的现象,早在 1894 年大森在研究 1891 年浓尾 8 级地震的余震特征时就已指出(大森房吉, 1894)。此后,诸如 1935 年台湾中部地震(大塚弥之助, 1936)、1943 年鸟取县

\* 1997-10-23 收到初稿, 1998-02-10 收到修改稿并决定采用。

7.4 级地震(井上宇胤, 1943)、1984 年长野县西部 6.8 级地震(吉田明夫, 佐藤典平, 1995)、California 地震(Kelleher, Isacks, 1982)、1995 年北 Sahalin 的 Neftegorsk 7.5 级地震<sup>①</sup>等的余震分布均显示了类似的性质。由此可见, 对于一般的直下型地震而言, 其余震分布倾向于集中在断层的单侧区域内。

## 1.2 震灾分布

本次地震震灾严重的分布区域在淡路岛方面, 为沿海岸的低洼地带及从野岛断层的南西端开始且沿断层的南西方向的地带, 而在震中附近的垂水和淡路岛的岩屋及其周围的灾情比预想的要轻得多, 且对应于野岛断层, 有的地方尽管观测到了明显的断层错位, 但断层上方总的受灾情况并不太严重(图 1); 而在神户方面, 烈度为Ⅶ度(日本气象厅烈度标准)的重灾区域主要分布于活断层的南侧。根据以往的震例, 震灾或者位于稍偏离断层的单侧区域, 或者位于断层的两端附近, 且震灾集中的地带并不一定必须对应于地震断层的位置。

可见, 尽管断层上存在着受灾严重的区域, 但其正上方同样也存在着受灾并不太严重的区域, 这表明断层正上方的某些部分地震动并不一定很强。

以上就余震及震灾的一般特征进行了简单地讨论, 对应于本次兵库县南部地震, 可以认定断层位于烈度为Ⅶ度的强震动带与余震域之间。由此可以推断, 神户方面地震断层位于余震域所分布的现有活断层域和烈度为Ⅶ度的细长形的强震动域之间。

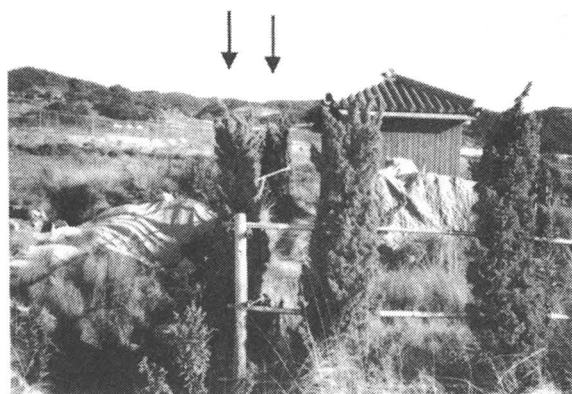
## 2 地震和断层

有关断层的定义, 因学科不同而存在着不同的定义。对于地震断层, 地质学、测地学及地震学等有着不同的定义。而对于同地震波相联系的震源断层, 具体有如下的几种定义: ① 为了解释远处所观测到的地震波而从数学上设想的在震源附近所存在的一种波动能量来源的断层; ② 地质学、测地学所设想的震源断层; ③ 从余震分布所推测的断层; ④ 从地震灾害分布所推测的断层。

以上各种对断层的定义必然会同实



(a)



(b)

图 1 野岛断层上方的受灾情况

(a) 野岛断层上面的道路明显错位; (b) 同断层上方破坏并不严重的房屋照片, 但房边的小树也出现错位。两照片所示位置标于图 3 中 1 所指位置

<sup>①</sup> Katsumata 等, 1995. 私人通信。

际的断层不完全吻合. 与从地震波角度考虑的动态断层模型相对应, 采用测地学、地质学的手段来说明地震前后地壳形变的静态模型也同样存在. 这里, 认为这种动态断层定义与静态断层定义分别对应不同的断层实体是比较合适的. 事实上, 对应于关东地震和南海道地震, 动态断层与静态断层之间存在着明显的差异(金森博雄, 1982), 所以, 认为它们所描述的不是同一实体是合乎实际观测资料的.

无论是为了说明震源的构造特征而采用地质学、测地学方法所设想的震源断层模型, 还是为了说明观测到的地震波特征而假设的模型, 所表征的并不一定是震源附近所实际发生的破坏过程. 事实上, 对于实际的非线性破坏过程, 采用线性弹性理论来计算, 无疑存在着较大的偏差. 地下深部所发生的破坏过程同地质学所定义的地表断层等的关连性具体如何, 迄今为止, 实际上并不太明确.

震源附近的破坏过程实际上是极其复杂的, 单纯用上述的断层模型并不能很好地反映震源附近的真实破坏过程. 对于引起建筑物破坏的地震波是从何处产生、又是怎样产生的这样的问题, 目前的地震学理论还不能明确地予以解释.

本次兵库县南部地震, 在神户方面, 现有的活断层系并未出现明显的活动, 因此, 本次地震的调查研究表明, 地表断层同地壳内的断层的构造运动之间应存在着明显的不同.

对于直下型地震, 震源深度仅为 2 km 的 1984 年长野县西部地震并未出现地表断层, 加拿大的震源深度为 6 km 的 1985 年 Nahanni 地震( $M_w=6.8$ ), 地表的活断层也未出现明显的活动(Wetmiller *et al.*, 1988). 对应于这种并不太强的地震, 多数场合下并不明显出现地表的断层运动. 另外, 美国 California 附近发生的 1994 年 Northridge 地震( $M_w=6.7$ )和 1971 年 San Fernando 地震( $M_w=6.7$ )的余震分布出现了部分重合区域(Mori *et al.*, 1995). 这两个地震都呈现逆断层特征. 由余震分布推测的结果为: 对应于 San Fernando 地震为北东向倾斜的逆断层; 对应于 Northridge 地震为南西向倾斜, 且表层部分为前者断层的一部分插入而形成的逆断层.

由此可见, 地表的现有活断层系同地震的发生之间的关系, 并不是传统的观点所能简单地阐明的. 有关地表构造及地下深部构造之间的关系, 还有待于今后地震学和地质学等跨学科的进一步共同研究.

### 3 强震动及其机理

#### 3.1 强震动及震害

对于实际的强震动, 地面的振动为一种冲击状的既具有强烈的纵向的振动, 也可能同时具有水平方向的振动. 其振幅及相位随地点而变化.

值得一提的是, 纵向的振动被认为可能是加重灾情的一个重要因素. 这一点对于理解淡路及阪神地区的这次震灾非常重要. 据有关报道, 本次地震中, 长田区一所中学内的天花板上用螺钉所固定的日光灯完全脱落掉下. 而在长野县西部地震及 Landers 地震等直下型地震中, 在震源的附近出现了半埋在土中的石头及倒落的树等飞出的现象, 在本次兵库县南部地震中也出现了类似的现象(西沢修等, 1995; 梅田康弘, 1995). 另外, 在强震带以外的六甲山上(图 3 中 2 所指位置)也出现了明显的地裂缝(图 2). 由此可见, 对于直下型地震随地点的不同可能出现强烈的纵向振动.



图 2 六甲山上出现的一条沿北西  $60^\circ$  方向、长  $60\sim 80\text{ m}$ 、宽  $50\text{ cm}$  及深  $50\text{ cm}$  的地裂缝

本次地震中,在地表层中的下水道和煤气管道供给网络等遭到了严重的破坏,而神戸高速铁路除了大开站以外,地下建筑物的破坏程度比较轻微.这表明强振动可能仅局限于最表层的地表面附近,这一点或许也是强震带强震动的特征.

对于强震带,木质结构的房屋的破坏区域主要集中在数十至数百米的长方形带状区域内,而根据被害区域及其周围破坏等的对比发现,稍稍偏离强震带的区域的破坏情况远比强震带轻.

类似于 1930 年北伊豆地震( $M=7.3$ )及 Northridge 地震,在被严重毁坏的房屋邻近,存在着几乎没被破坏的房屋的现象,在本次地震中也并不少见.据 1930 年北伊豆地震的震害调查结果,此类现象被 Terada 和 Miyabe(1931)称为“高选择性”.此类震害分布的差异性也许是震害的一种共同特征.

对于已有的许多地震,震害的一个共同特征是重灾区往往集中在沿着古老河流的冲积层地区.一般而言,新建建筑物的破坏较少,而以木质结构为主的旧房屋的破坏较多.但是为什么在强震带中有的建筑物并未倒塌或毁坏的情形也并不少见呢?这表明这种强震动破坏可能是一种有赖于地基条件及建筑物结构等多种因素的具有某种选择性的破坏过程.这一点对于理解本次阪神震灾的特点非常重要,此类现象同 Terada 和 Miyabe(1931)所描述的北伊豆地震的震灾状况非常一致,这也许是内陆直下型地震所具有的一种共同的特征.

### 3.2 强震动的机理

令人感兴趣的是,本次阪神地震的烈度为Ⅶ度的强震动带正好分布在六甲地区花岗岩同冲积层交界附近的区域内(图 3).由此我们似乎可以推测,本次大地震的强震动是由于六甲山的花岗岩体周围的冲积层中的表面波的波动而激发的.该波动为一种波长从几十米至一二百米的较短波长为主的非线性波动.强震动带并不满足线性弹性理论的条件,因此有关强震动的研究,有必要考虑包含非线性作用及纵向波动的新的物理模型. Richter (1958)曾强调在强震时软弱地基中可能存在特定的驻波和行波.此类机制的可能性还有待于今后进一步的探讨.以下将讨论两种可能的强震动机理.

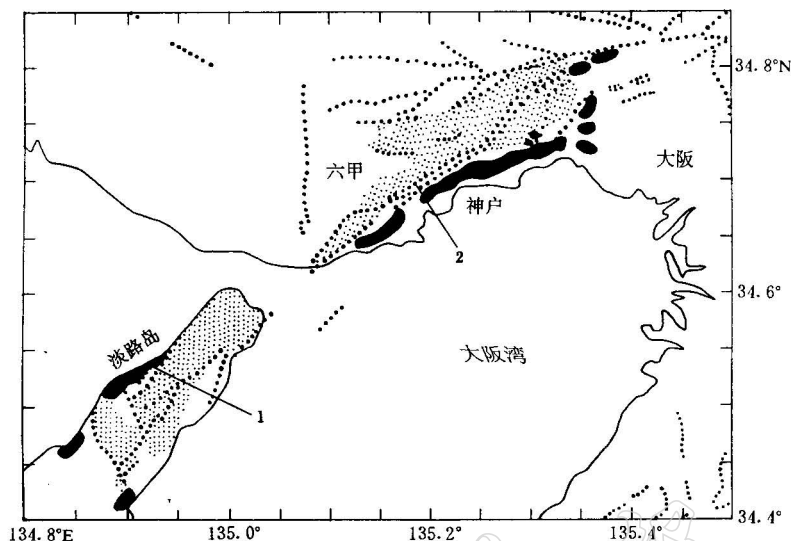


图3 1995年神户地震的强震动带及花岗岩分布  
点线代表活断层; 点区代表花岗岩体; 暗区代表烈度为Ⅶ度(日本气象厅标准)的强震动带。1. 图1中照片处示的位置; 2. 图2中地裂缝的位置

### 3.2.1 冲击波

实际上,对应于本次地震,约70 km长的地震断层的主破裂过程仅经历了十几秒钟,这是一种非常快的破坏过程。在有的地方,破裂速度甚至有可能超过音速。值得一提的是,对于坚硬岩基与相对较柔软的介质交接的地方,在理论上存在着破裂速度大于音速的可能(Langer, Nakanishi, 1993)。而在表层部冲积层中,地震波P波速度仅为2~3 km/s左右,同实际破裂过程相比,速度明显太小,S波速度则更低。此时,在震源附近花岗岩与冲积层的交界处,可能出现冲击波(Bouchon, 1979)和Cerenkov放射(Langer, Nakanishi, 1993)等现象。可能正是此种冲击状的振动导致了上述快速破裂的现象。

### 3.2.2 重力波

剧烈的纵向振动及集中于最表层的冲击状的振动现象,使人认为存在重力波发生的可能性。重力波指的是由于重力的回复作用而在流体中所形成的一种波动。它通常出现于具有很低剪切波速的表层。事实上有关强震时的强震动可能同重力波的作用有关,这一点很早就有人指出。例如,大森房吉(1894)对浓尾地震、Matsuzawa(1925)对关东地震( $M=7.9$ , 1923年)等曾分别进行过有关的讨论。1948年6月28日发生的7.1级福井地震时,在观测到地面及屋檐等的波动现象的基础上,对重力波现象也进行了相应地讨论<sup>①</sup>。最近,基于对1960年智利地震及1985年墨西哥地震的体验,Lomnitz设想这类强震动是由于存在着重力波的作用(Lomnitz, 1970, 1990),并认为在大地震的震中区域所观测到的具有大振幅和较长周期的所谓“可见波”就是重力波。另外,从理论上对半固体的地基中重力波存在的可能性也进行了各种讨论(Matsuzawa, 1925; Lomnitz, 1990)。

大阪湾沿岸一带所发生的大量的液化现象表明,软弱地基在强震动的作用下容易液

① 福井烈震誌, 1978. 福井市: 吉田錦文堂。



化. 此时, 在重力及周围介质的弹性回复力作用下, 可能出现具有流体力学特征的波动现象. 果真如此, 则强震带中有的地方可能存在包含纵向振动的强震动的作用.

## 4 次生破裂(secondary fracturing)

如何解释本次阪神大地震的震灾状况, 不仅对本次地震的震后总结, 对将来的防灾研究也具有十分重要的意义. 本次地震震灾的一个明显特征是呈现带状分布. 震灾的带状分布情形在其它的地震调查中也经常发现. Terada 和 Miyabe(1931)在对 1930 年北伊豆地震时三岛市的灾害调查中发现震灾呈带状分布, 并用地震的“路径”来加以描述. 有关此类强震动形成的机理, 可认为是与地振动所生成的局部二次振动源的作用有关. Terada 和 Miyabe(1931)称之为次生波(secondary waves), 考虑到这易与地震的 S 波相混淆, 本文将借鉴其思想并称之为次生破裂(secondary fracturing).

1964 年新潟 7.4 级地震时, 南云昭三郎(1964)曾指出, 在距震中几十公里远的山形县西部的鼠ヶ関—山五十川之间存在着带状的强震动区. 在此类观测的基础上, 南云昭三郎认为地震时断层作为振动源, 除了可能引起地壳形变等结果外, 还可能由于伴随着地震波的传播, 振动的不连续会产生某种特别的振动, 从而出现前述所观测到的强震动现象.

1989 年 California 的 Loma Prieta 所发生的 7.1 级地震的主震震源机制具有右旋特征, 而地表所出现的地震断层是在偏离预想断层位置的地方, 由于左旋作用下地壳形变而形成的(U. S. Geological Survey Staff, 1990). 对应于 Northridge 地震, 尽管地表并未出现地震断层, 但在大范围内, 地表出现了与地滑动并不一致的地形变(Scientists of the U. S. Geological Survey and the Southern California Earthquake Center, 1994).

总之, 即使是在偏离震源的地方, 伴随着地震波的传播, 由于振动的不连续性而能生成某种特别的振动. 其成因可认为是由于二次的破裂作用而形成的. 这种次生破裂可用来解释震源附近的强震动现象. 因此, 这种次生破裂现象在防灾研究中具有重要的意义.

## 5 结论与讨论

根据过去所发生的内陆直下型地震的实例, 对有关内陆直下型地震的发生和断层关系的讨论归纳如下: ① 地表断层系同地下断层系的构造可能存在着较大的差异; ② 地震并不一定受既存活断层系(地表断层系)的构造活动的制约; ③ 余震多分布于地表断层的单侧较广的范围内; ④ 强震动域并不与震源断层位置直接相对应, 而多出现于稍偏离断层两端的区域内或断层单侧稍远处的区域内.

综上所述, 为了更好地解释现代地震学所不能较好地解释的震源附近的各种现象, 有必要引入新的物理模型; 为了更好地讨论震源附近的强震动特征, 有必要考虑非线性的具有流体力学性质的波动作用、冲击波作用及次生破裂等的影响; 而震源附近的物理过程也并不能只用简单的弹性理论来讨论, 而应该结合非弹性分析等手段, 才可能更准确地描述这种真实的物理过程.

此次阪神大地震指出了不少有待解决的问题. 而有关本次地震的不少调查及研究成果也已分别整理成册. 事实上, 本次地震的震灾特征只是以往所发生的内陆直下型地震的震灾所共有的特征; 而且可以预测, 将来发生的直下型地震也将出现具有类似特征的震灾.

许多震例已给我们提出了不少有待解决的问题. 从现在开始, 我们将充分结合地震学

和其它相关的科学, 尝试进行跨学科的共同研究, 以逐步解决上述各种问题.

## 参 考 文 献

- 井上宇胤, 1943. 9月10日の鳥取地震概況. 鳥取地震外報. 中央气象台. 147pp
- 金森博雄, 1982. 新しい地震観, 地球の物理—現代の地球観—. 日本: 丸善. 371pp
- 南雲昭三郎, 1964. 新潟地震踏査概況. 地震研究所速報, (8): 27~35
- 西沢修, 佐藤隆司, 杉原光彦, 1995. 跳躍現象から推定される断層近傍での強い揺れ. 地質ニュース, (491): 9~16
- 大森房吉, 1894. 震災予防調査会報告, 2: 118~119
- 大塚弥之助, 1936. 昭和10年4月21日台湾中部地方に起こった地震に伴える地震断層, 付地震断層の諸特徴, 地震研究所彙報, (13): 15~27
- 梅田康弘, 1995. 1995年兵庫県南部地震の破壊成長過程—地震のブライトスポットと飛び石—. 地質ニュース, 490: 50~55
- 吉田明夫・佐藤興平, 1995. 地震活動と地質構造(2)—余震分布の非対象性—地質ニュース, 486: 27~39
- Bouchon M., 1979. Predictability of ground displacement and velocity near an earthquake fault: an example; the Parkfield earthquake, 1966. *J Geophys Res*, 84: 6149~6156
- Kelleher J., Isacks B., 1982. Directional hypothesis: Late stage preearthquake loading may often be asymmetric. *J Geophys Res*, 87: 1743~1756
- Langer J S., Nakanishi H., 1993. Models crack propagation, two-dimensional model with dissipation on the fracture surface. *Phys Rev(E)*, 48: 439~448
- Lomnitz C., 1970. Some observations of gravity waves in the 1960 Chile earthquake. *Bull Seism Soc Amer*, 60: 669~670
- Lomnitz C., 1990. Mexico 1985: the case for gravity waves. *Geophys J Int*, 102: 569~572
- Matsuzawa T., 1925. On the possibility of gravitational waves in soil and allied problems. *J Inst Astr Geophysics, Tokyo*, 3: 161~174
- Mori J., Wald D J., Wesson R L., 1995. Overlapping fault planes of the 1971 San Fernando and 1994 Northridge, California earthquakes. *Geophys Res Lett*, 22: 1033~1036
- Richter C F., 1958. *Elementary Seismology*. San Francisco: W H Freeman and Company. 768pp
- Scientists of the U S Geological Survey and the Southern California Earthquake Center, 1994. The magnitude 6.7 Northridge, California, earthquake of 17 January 1994. *Science*, 266: 389~397
- Terada T., Miyabe N., 1931. On the heterogeneous distribution of houses destroyed by earthquake. *Proceeding of the Imperial Academy*, 7: 146~149
- U S Geological Survey Staff, 1990. The Loma Prieta, California, earthquake: an anticipated event. *Science*, 247: 286~293
- Wetmiller R J., Hoener R B., Hasegawa H S., et al., 1988. An analysis of the 1985 Nahanni earthquakes. *Bull Seism Soc Amer*, 78: 590~616