断層の破壊過程と被害分布

東京大学地震研究所 宮 武 隆

(昭和 59 年 3 月 7 日受理)

Earthquake Source Process and Damage Distribution

Takashi MIYATAKE

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

(Received March 7, 1984)

The ground motions caused by a shallow strike-slip fault with barriers have been calculated from a three-dimensional crack model. The faulting motions have been modeled as spontaneous three-dimensional crack propagation in an elastic half space. The ground displacements and particle velocities are obtained at each grid point of a finite difference method. The results indicate that there appear two different regions with high particle velocities. One is the end zone of rupture propagation and the other is just above the barrier. If we assume that earthquake damage depends upon the particle velocity on the ground surface, it may be suggested that the damage would be largest near the barrier and at the end zone of rupture propagation. If this is the case, the positions of barriers and end points of rupture propagation for large inland shallow-focus earthquakes would be located from the distribution of damage.

§1. はじめに

DAS and AKI (1977) によつてバリアーモデルが提案されて以来、これに関する理論的、応用的研究が数多くなされてきた [BOUCHON (1978), MIKUMO and MIYATAKE (1978) 等]. これによつて従来の長周期地震学では説明されなかつた、建築物にとって重要な短周期地震波をよく発生し得ることがわかつた. ごく単純に考えるとバリアー付近に被害が多くなりそうである. しかしこのことは証明されていない. 理論的研究の現状はこのようであるが、一方、データとしては地震断層の真上又はそのごく近傍に建物が存在する場合もあり被害の詳細が求まっている [例えばまとめとしては、宇佐美 (1975), 科学技術庁国立防災科学技術センター (1979) 等]. それによると被害分布の非対称性などの偏りが存在する場合がある (三河地震, 濃尾地震等). この偏りは建物下の地盤の影響は勿論であるが、断層面の形状、傾斜、建物との距離、方位、断層面上のバリアーの分布などにも大きく依存すると思われる. このうち、例えば断層の傾斜については、三河地震のような逆断層タイプの地震では断層の上盤側に被害の多いことが安藤・川崎 (1973) によつて示されている. 本稿では震源過程、特にバリアーの存在によつて被害分布がどのように変化するかを調べる.

Fig. 1. Schematic figure of three-dimensional crack model.

Fig. 2. Rupture time on the fault plane normalized by W/V_s .

- (a) Case of uniform strength.
(b) Case of single belt-like barrier.

§2. 計算方法

方法は MIYATAKE (1980) とほぼ同じで 3 次元の半無限弾性媒質 (Fig. 1) で差分法を使うのだが、破壊の伝播は Fig. 2(a), 2(b) のようである。(a) は断層面上にバリアーの存在しない場合、(b) は断層面の中央に帯状のバリアーの存在する場合の断層面上の各点での破壊時刻である。(a) では破壊はほぼ円形で S 波の約 0.8 倍で伝播しており、(b) ではバリアー部で S 波の約 0.2 倍、バリアー以外で (a) と同じ速さで伝播している。なお IRWIN の破壊の条件の数値計算上の適用についての重要なコメントが吉田 (1983) によつてなされた。これは「Das (1976), Das and AKI (1977), MIYATAKE (1980), Das (1981) では応力拡大係数の代用として強度と比べるべき応力をクラック先端以外でも計算し破壊条件に入れていた。応力拡大係数はクラック先端でのみ意味のある量である。この誤りによつて高い強度部分を破壊が飛び越して伝播することが起こりやすくなる。」という指摘である。ここではクラック先端以外の応力は破壊条件を適用しないという条件を入れて再計算の後、破壊の伝播を決めている。なおこれについては別に述べる予定である。ここでは破壊過程の計算と波動の

計算を分けている。これは以下に述べる理由による、

- 1). 破壊強度を与えて破壊過程を計算するのは、試行錯誤なので無駄が多い。
 - 2). 波動の計算には破壊過程の計算よりも多くの時間ステップが必要である。
 - 3). 破壊過程の計算には $t=0$ にある大きさの初期破壊が必要であるが、これによる人工的な波動を取り去らなければいけない。
 - 4). 強度の不均質のためでなく計算上の誤差のために破壊進行が多少ぎくしやくすることがあり、スムーズにする必要がある。
- 1), 2) を解消するためにあらかじめ破壊過程を計算しておく。求めた断層面上での破壊時刻を $t=0$ で破壊が点から出発するように初期破壊を外挿する。最後に誤差によると思われる

Fig. 3 (a). Displacement-time functions in the case of uniform strength.

Fig. 3 (b). Displacement-time functions in the case of barrier.

くしやくした部分をスムーズにする。以上のようにして、作成したのが Fig. 2 の破壊過程である。差分法を使いこの破壊時刻に断層面上で各点で応力を解放させて変位を計算し波動を生じさせる。以上の操作は、単に計算の効率のための便宜的なものにすぎない。バリアー部で一旦破壊が停止するか、破壊伝播速度がある程度おそくなることが結果にとって重要である。

断層面は垂直横ずれで深さは 2~8 km, 長さは 20 km である。差分の格子間隔は断層面に近い部分は 1 km, これより外は 1.2 倍ずつ増して計算機での記憶容量と計算時間を節約している。計算時間間隔は 0.1 秒, 媒質の P 波, S 波の速度, 密度は, それぞれ 5.5 km/秒, 3.2 km/秒, 2.75 g/cm³ である。断層上のストレスドロップは 100 bars である。

§3. 計算結果

Fig. 3 に断層上の変位時間関数と変位速度の時間関数の断層長さに沿う成分 (X 成分) を示

Fig. 3 (c). Particle velocities in the case of uniform strength.

Fig. 3 (d). Particle velocities in the case of barrier.

す. 3次元の矩形クラックでバリアーなしの場合については **DAS (1981)** により, バリアーの存在する場合については **MIYATAKE (1980)** により解かれている. **Fig. 3** はそれらの結果とほとんど同じであるが, 細長い断層では最終変位とライズタイムは断層の長さに依存せずに断層の幅に依存する. これは2次元クラックと大きく異なる点である. 2次元問題の場合には **DAS (1976)**, **DAS and AKI (1977)** によつて解かれている. この場合バリアーを通過する破壊ではバリアー部の破壊の影響が逆戻りして伝わり, 波源 (ある時刻に断層面上で変位速度の大きい部分) が逆方向にも移動する. しかし有限の幅を持つ3次元クラックではこのようなことは, 起こっていないようである. ただし **MIYATAKE (1980)** でも示したようにバリアーの遅れ破壊は見掛上マルチプルショックでの逆方向の破壊伝播を生じる. **Fig. 4** は地表の変位波形, 変位速度波形の一部を示している. 変位速度の細い振動は計算上の誤差のためと思われるこれに

Fig. 4 (a). Z-components of ground motion in the case of uniform strength.

Fig. 4 (b). Z-components of ground motion in the case of barrier.

についての詳細な議論はできないが、最大値の比較程度ならば問題はなさそうである。Fig. 5は地表での変位速度の絶対値の最大値の分布を示したものである。なお図では断層の片側のみを示してある。図の下の方に示したのは断層の範囲とバリアーの位置である。値は最大値が1になるように規格化してある。これを見ると、バリアーの存在しない場合では破壊の停止端付近（正確には、停止端のさらに少し延長上）に極大値が存在する。このことは BOUCHON (1980) が DW 法によつて示していることであり今回の計算の正しさを裏付けるものである。一方、

Fig. 4 (c). Z-components of particle velocity in the case of uniform strength.

Fig. 4 (d). Z-components of particle velocity in the case of barrier.

バリアーの存在する場合では破壊の停止端だけでなくバリアーの真上付近にも極大値が現われる。ここでは破壊過程をユニラテラルで計算したがバイラテラルの場合は、両端が停止端になるので両端に変位速度の極大が期待される。

§4. 被害分布

もし地震の被害が地表の変位速度に依存すると仮定すると被害は、地震の破壊過程の破壊停止端付近と断層面上のバリアー付近に集中するはずである。例えば Guatemala 地震 (1976) の破壊は断層北東端付近から出発し、いくつかのサブイベントの破壊の後、南西端で停止したことがわかつている [KANAMORI and STEWART (1978)]。この地震の被害は断層の南西端と、中央付近に集中している (Fig. 6a)。厳密な議論には表層地質の影響を考えないといけないが、バリアーおよび破壊停止の影響がかなり大きいと考えてもよいのではないだろうか。濃尾地震においても MIKUMO and ANDO (1976) により破壊は断層の北西端より出発し南東方向に伝播したと仮定すると地震記象をよく説明できることが示されている。この地震の被害のうち断層の南東延長上の名古屋付近の被害は軟弱地盤の影響が大きいのであるが、断層の南東端付近

Fig. 5. Distributions of maximum absolute particle velocities on the surface near fault.

の大きな加速度 (Fig. 6b) や、断層の折れ曲り付近で住家全潰率が高い (Fig. 6c) のは、もしかすると破壊伝播の停止端の影響やバリアーの影響かもしれない。1927年丹後地震 [KANAMORI (1973)] では郷村、山田の2つの断層が現われているが、山田断層が地震波を発生させたかどうかは、不明である。しかしいずれにしても破壊は地表の郷村断層のほぼ中央付近から南北両方向に進み、このうち南方向の進行は山田断層にぶつかって停止している。従つて郷村

1976 GUATEMALA

1891 NOBI

1927 TANGO

1930 KITA-IZU

Fig. 6. Distribution of damage or intensity. $\otimes$ means the epicenter.
 (a) Modified Mercalli intensity distribution for 1976 Guatemala earthquake modified from ESPINOSA, HUSID and QUESADA (1976).
 (b) Accerlation distribution for 1891 Nobi earthquake after NATIONAL RESEARCH CENTER for DISASTER PREVENSSION (1978).
 (c) Damage distribution for 1891 Nobi earthquake after NATIONAL RESEARCH CENTER for DISASTER PREVENSSION (1979). (d) Damage distribution for 1927 Tango earthquake modified from TANIGUCHI (1927). (e) Damage distribution for 1930 Kita-Izu earthquake modified from TSUCHI (1980). (f) Damage distribution for 1944 Tonankai earthquake modified from MIYAMURA (1964). Dashed line shows the fault model by INOUCHI and SATO (1975). (g) Damage distribution for 1946 Nankaido earthquake modified from KANAI, TANAKA and KANEKO (1949).

断層の両端に被害が多いと期待される。一方被害分布 (Fig. 6d) はまさに期待どおりの分布をしている。北伊豆地震では断層の両端付近に被害が多いようにみえる (Fig. 6e) [土 (1968)]。この地震は破壊の出発点、即ち震源が断層のほぼ中央にあるので破壊はバイラテラルに伝播したことになる。従つて破壊の停止端は断層の両端にあり、この地震も、ここでの計算結果と一致する。東南海地震においては、被害は渥美半島、知多半島、御前崎付近に多い (Fig. 6f) [宮村 (1946)]。勿論この付近は地盤の悪い場所でありこれを原因にすることもできるが、本稿の計算結果を考慮すると、この付近の大きな被害は断層の停止端に近いと考えることもできるかもしれない。南海道地震において高知県西部の中村で被害が多い (Fig. 6g) [金井・田中・金子 (1949)]。これを説明するのに従来、1) 地盤、2) 副断層 [KATO (1983)]、3) 断層面の修正 [ANDO (1982)] という考えがあつた。今回の計算結果から考えると破壊の停止の影響とも解釈できる。東南海、南海道地震のような逆断層タイプの地震に垂直横ずれ断層の計算結果を適用するのは問題かもしれない。しかし計算の本質は細長い断層での破壊停止端とバリアー付近の大きな変位速度であり、これは断層の傾斜によらないと期待される。福井地震においては、残念ながら震源地付近の被害はいわば飽和してしまつていたので詳しいことはわからない。1978 年伊豆大島近海地震の詳細な被害分布は茅野 (1978) によつて求められている。これによると破壊の出発点に近い伊豆大島よりも停止端に近い伊豆半島での被害の方が多く、ここでの計算結果と一致する。以上のようにデータを調べると被害は震源での破壊の停止端に多いことがわかつた。また断層面上のバリアーに関連して被害が多いと思われる場合もあつた。このことから考えると、古い巨大地震での震央の推定には注意が必要である。

§5. 結 論

今回の計算結果とデータ調査から求めた重要な結論は以下の通りである。

- 1) 地震の被害の集中するのは破壊の出発点ではなく破壊の停止端とバリアー一部である。
- 2) もし地盤の影響を除けるならば被害分布から破壊の進行方向やバリアーの位置が推定可能である。

謝 辞

京都大学防災研究所の三雲健教授には、論文の作成にあたつて大変お世話になりました。京都大学防災研究所の安藤雅孝博士、気象庁の津村建四朗博士、東京大学地震研究所の宇津徳治教授、山科健一郎博士、茅野一郎博士との議論は大変有益でした。ここに感謝いたします。

文 献

- ANDO, M., 1982, A Fault Model of the Nankaido Earthquake Derived from Tsunami Data, *Phys. Earth. Planet. Inter.*, **28**, 320-336.
- 安藤雅孝・川崎一郎, 1973, 低角逆断層近傍の加速度一上盤側と下盤側の非対称について一, 地震学会講演予稿集, No. 2, 107.
- BOUCHON, M., 1978, A Dynamic Source Model of the San Fernando Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **83**, 1555-1576.
- BOUCHON, M., 1980, The Motion of the Ground during an Earthquake, 1. The Case of Strike Slip Fault, *J. Geophys. Res.*, **85**, 356-366.
- DAS, S., 1976, A Numerical Study of Rupture Propagation and Earthquake Source, Ph. D.

- thesis of M.I.T.
- DAS, S. and K. AKI, 1977, Fault planes with Barriers: A Versatile Earthquake Model, *J. Geophys. Res.*, **82**, 5648-5670.
- Das, S., 1981, Three-dimensional Spontaneous Rupture Propagation and Implication for the Earthquake Source Mechanism, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **67**, 375-393.
- ESPINOSA, A. F., R. HUSID and A. QUESADA, 1976, Intensity Distribution and Source Parameters from Field observations, *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, No. 1002, 52-66.
- INOUCHI, N. and H. SATO, 1975, Vertical Deformation Accompanied with Tonakai Earthquake of 1944, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **21**, Part 1, 10-18.
- 金井 清・田中貞二・金子重彦, 1949, 高知県に於ける南海地震の建物被害調査報告, 南海大震災誌, 高知県, 1-18.
- 科学技術庁国立防災科学技術センター, 1979, 地震断層付近の震害に関する調査, 防災科学技術資料 第 39 号.
- KANAMORI, H., 1973, Mode of Strain Release Associated with Major Earthquake in Japan, *Ann. Rev. Earth. Planet. Sci.*, **1**, 213-239.
- KANAMORI, H. and G. S. STEWART, 1978, Seismological Aspects of the Guatemala Earthquake of February 4, 1976, *J. Geophys. Res.*, **83**, 3427-3434.
- KATO, T., 1983, High-angle Reverse Faulting Associated with the Nankaido Earthquake, *Tectonophysics*, **96**, 31-44.
- 茅野一郎, 1978, 1978 年伊豆大島近海地震の通信調査による被害, 震度等の分布, 地震研究所彙報, **53**, pp. 793-813.
- MIKUMO, T. and M. ANDO, 1976, A Search into the Faulting Mechanism of the 1891 Great Nobi Earthquake, *J. Phys. Earth.*, **24**, 63-87.
- MIKUMO, T. and T. MIYATAKE, 1978, Dynamical Rupture Process of a Three-dimensional Fault with Non-uniform Friction and Near-field Seismic Waves, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **54**, 417-438.
- 宮村撰三, 1946, 東海道地震の震害分布 (その 1), 地震研究所彙報, **24**, 99-104.
- MIYATAKE, T., 1980, Numerical Simulations of Earthquake Source Process by a Three-dimensional Crack Model, Part 1. Rupture Process, *J. Phys. Earth.*, **28**, 565-598.
- 谷口 忠, 1927, 丹後地震における建築物の被害について, 地震研究所彙報, **3**, 133-162.
- 土 隆一, 1980, 1930 年北伊豆地震の地盤災害, 自然災害科学資料解析研究, **7**, 8-14.
- 宇佐美龍夫, 1975, 資料・日本被害地震総覧, 東京大学出版会.
- 吉田真吾, 1983, 破壊力学に基づいた震源関数——マルチプルショックと高周波発生源について——, 地震学会講演予稿集, No. 2, 212.