

# 断層面上の構成関係が地震動に与える影響

谷山 尚

正会員 理修 埼玉大学助手 工学部建設工学科 (〒338 浦和市下大久保 255)

断層上の動特性は、摩擦法則によって規定されていると考えられる。摩擦を調べる岩石実験により、破壊後瞬間的に応力は低下するのではなく、すべりとともに低下することが明らかになっている。この応力が低下するのに必要なすべり量が地表の地震動に与える影響について検討した。断層上端の深さを1kmとした幅10km、長さ20km 応力降下量100bar(10MPa)の横ずれ断層について地表での最大速度を計算した結果、2Hz以下の周波数に対しては必要なすべり量の値が20cm程度以下であれば、最大値やその分布パターンに対してあまり影響を与えないが、この値が数十cm以上になってくると、地震動が小さくなるなどの影響が出てくる可能性が示された。

*Key Words: friction law, near field strong motion, source effect*

## 1. はじめに

断層近傍で生じる地震動を予測するのは耐震工学上非常に重要である。断層近傍での地震動を求める決定論的手法の1つに動力学的モデルによる手法がある(例えば文献<sup>1),2)</sup>。動力学的モデルでは断層面上の応力降下量、強度分布(または、破壊開始時刻)から地震動を計算するため、すべり時間関数はあらかじめ仮定するものでなく、計算の結果求まるものとなる。断層上での動きをより合理的に求めることができ、断層近傍の地震動を計算するには有用な手法である。

現実の地震の地震波解析結果を基に、動力学モデルで計算した結果、例えば、すべり速度の最大値は、5Hz以下の振動数で、5m/sに達することが示されている。これらの解析は破壊に達すると瞬間的に応力が低下するとして計算している。

震源断層上での動特性を規定すると考えられる摩擦法則が岩石実験により明らかになりつつある。これによると破壊応力に達した後に応力は瞬間的に低下するのではなく、すべりの進行とともに低下する。このような実験結果から、Slip Weakening モデル(例えば文献<sup>3)</sup>)や rate- and state-dependent friction law (例えば文献<sup>4,5)</sup>) と呼ばれる摩擦法則が提案されている。この応力が低下するのに必要なすべり量の値は、実験室では $\mu\text{m}$ のオーダーの値が得られているが、実際の地震での値は必ずしも明らかではなく、rate- and state-dependent friction law を用いた断層運動の解析においては1cm程度から十数cm程度の値が用いられることが多かった(例えば文献<sup>6,7,8)</sup>)。

その一方で、地震波の解析から、兵庫県南部地震にお

いて、淡路島下ではこの値は1mに達していたとされている<sup>9)</sup>。

摩擦法則を考慮に入れた解析は過去に数多くされているが、そのほとんどは破壊伝播や断層の動きについて調べたものであり、地震動について調べられたものとしては、応力が低下するのに必要なすべり量を1mとして、2次元で行われたものしかない<sup>10)</sup>。

断層での破壊過程や地下構造から2Hz程度の周波数まで決定論的に地震動の計算がなされている。本研究では、このような周波数の地震動に対して、応力が低下するのに必要なすべり量が、どの程度の値であると、断層近傍の地震動に影響を与えるのか、そして影響はどのように現れるかについて検討した。

## 2. 解析手法および解析モデル

断層幅10km、断層長20kmの横ずれ断層を対象とし、断層上端の地表からの深さを1kmとして、図1のように断層を含む $60\text{km} \times 30\text{km} \times 30\text{km}$ を計算領域とした。断層を含む面に関する対称性を考慮して、断層の片側半分だけをモデル化している。計算領域を格子間隔200mのスタッガードグリッドを用いて分けて、時間間隔0.01秒で、3次元差分法<sup>11)</sup>により20秒間計算した。応力が低下するのに必要なすべり量の影響を見るために、モデルは単純なものを考え、媒質としてはP波速度5.2km/s、S波速度3.0km/s、密度 $2.5\text{g/cm}^3$ と一様なものを仮定し、断層上での破壊についても、断層左端の中央から一定の破壊速度(2.4km/s)で円状に伝播するものとし、応力降下量(図2において $\tau - \tau_d$ )は100bar(10MPa)で

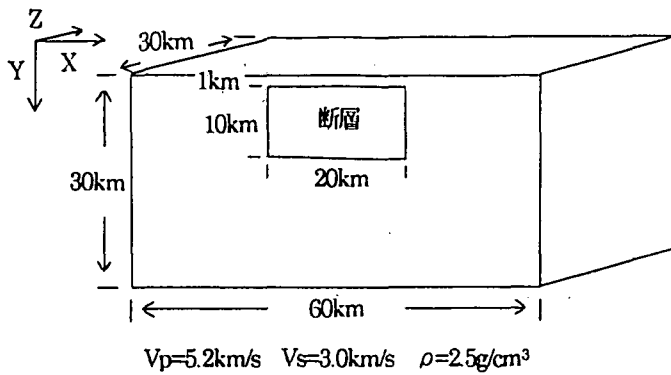


図-1 解析モデル

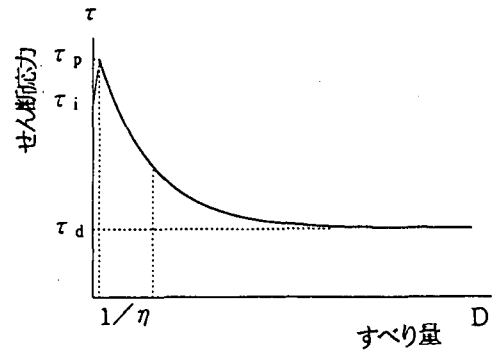


図-2 仮定したすべり量と応力の関係

一定と仮定した。

前述したように、摩擦法則については rate- and state-dependent friction law や slip weakening モデルによって定式化されているが、本研究では、応力が低下するのに必要なすべり量に着目し、せん断応力とすべり量の関係として、破壊までは線形、破壊応力に達してからは、破壊後に生じたすべりに伴い指数関数的に応力が低下すると仮定して、以下のように与えた(図2)。

$$\tau = (\tau_p - \tau_d) \exp(-\eta D) + \tau_d \quad (1)$$

ここで、 $\tau_p$  は破壊応力、 $\tau_d$  は残留強度で、 $D$  は破壊後に断層面上で生じたすべり量である。 $D$  が  $1/\eta$  になると、せん断応力と残留応力との差は、破壊応力と残留応力との差の  $1/e$  になる。本解析においては、 $1/\eta$  を応力が低下するのに必要なすべり量の指標として用いることにする。

断層面上の各点において、破壊時刻以後は、その点で生じた滑り量に応じて(1)式に従って応力が低下するものとして解析を行う。ただしここで  $D$  は、スタッガードグリッドを用いているため、断層上でのすべりではなく、断層から半グリッド(100m)離れた点でのすべり量となる。半グリッドずれた点においても断層上のすべり量を近似できると考えられるが、断層上では破壊開始までは変位が生じないのに対して、半グリッドずれた点では、破壊以前にも伝播してきた波による変位が生じ、また、破壊後の変位も断層面上に比べると小さいなどの違いがある。半グリッドずれた点のすべり量を用いることで、 $1/\eta$  の影響を大きめに見積もることになる。破壊を伝播させるため、破壊開始点及びその隣接点においては、瞬間的に応力が低下するものとし、また、断層上においては変位が減少することがないように拘束した。

破壊時刻に断層上のせん断応力を1タイムステップで落とす場合、 $1/\eta$  の値を 5cm, 10cm, 20cm, 40cm とした場合について計算を行った。

断層面を含む面と自由表面以外の境界面は消波境界を使用し<sup>12)</sup>、また、計算上の数値分散を安定化させるため

に、媒質にわずかながら人工的な粘性を与えている。

差分法における離散化による数値分散を考慮し、計算された波形に pass frequency, stop frequency がそれぞれ、2Hz, 4Hz のローパスフィルターをかけた。

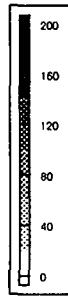
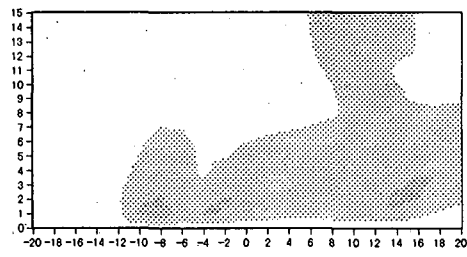
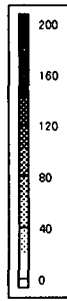
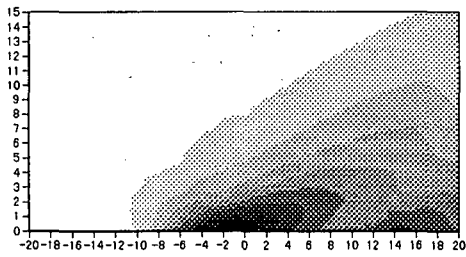
### 3. 解析結果

断層が破壊したときに顕著なパルスのS波が現れ、このパルスのS波が最大速度を担う<sup>13)</sup>ことから、地表面に生じる最大速度分布によって地震動を評価することとする。

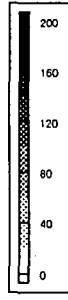
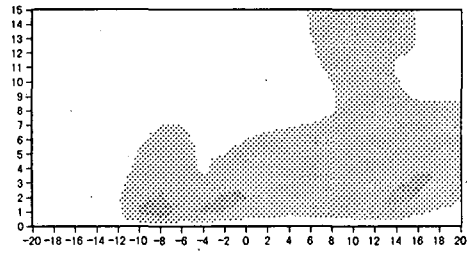
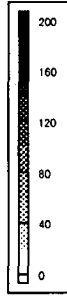
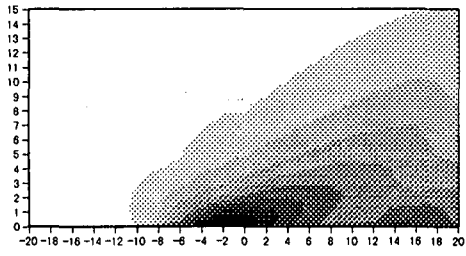
図3に1タイムステップで応力を低下させた場合及び  $1/\eta$  の値を変えた場合の地表面での最大速度の分布を示す。図3 aが1タイムステップで応力を落とした場合、図3 bが  $1/\eta=5\text{cm}$ 、図3 cが  $1/\eta=10\text{cm}$ 、図3 dが  $1/\eta=20\text{cm}$ 、図3 eが  $1/\eta=40\text{cm}$  の結果である。いずれの図においても左側が断層に直交する方向の水平速度、右側が断層に平行な方向の水平速度の最大値の分布を示しており、下端の-10km から10km が断層の位置になっている。スケールはすべての図で統一されており、色が濃いところほど大きな速度となっている。

今回の解析では、断層上端の深さを1kmとしているため、断層に平行な速度については、地表において連続かつ断層を含む面で反対称となるために、断層直上での値が0となり、断層からやや離れたところで最も大きくなる。これに対し、断層に直交する速度は断層直上で最大値を取り、その値も断層に近いことから平行成分に比べて大きなものとなっている。

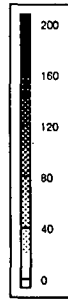
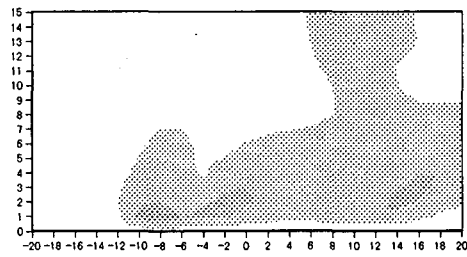
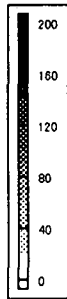
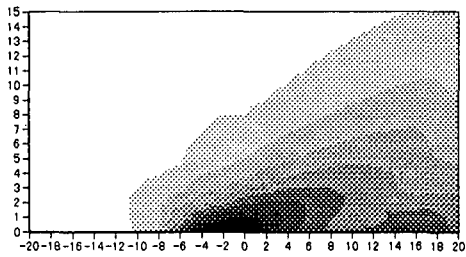
断層直交成分の最大速度分布を見ると、応力を1タイムステップで低下させた場合は断層直上の中央部分で大きな地震動が生じており、また、断層延長右方向でもやや大きな地震動が生じている。 $1/\eta$  が 5cm, 10cm の場合においても同様なパターンを示しており、値もほとんど同じ値となっている。 $1/\eta$  が 20cm になると、速度が最大となるところが中央からやや右側にずれ、最大速度分布のパターンにも違いが認められるようになるが、概



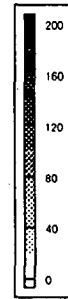
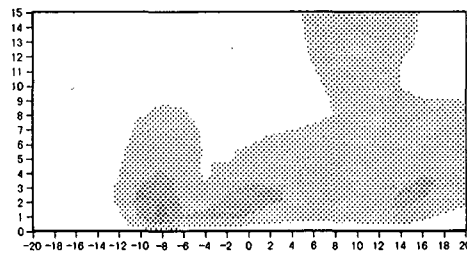
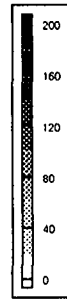
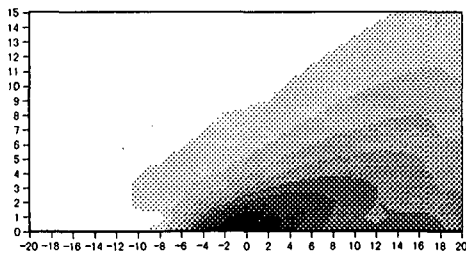
a. 1タイムステップで応力を低下させた結果



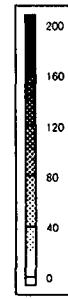
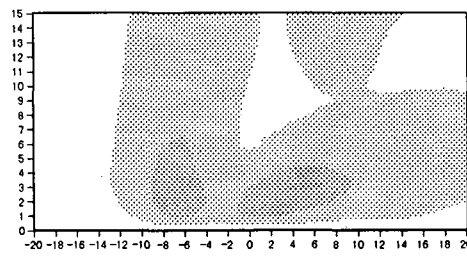
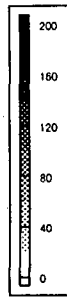
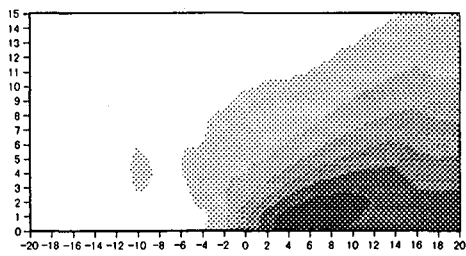
b.  $1/\eta = 5 \text{ cm}$ の結果



c.  $1/\eta = 10 \text{ cm}$ の結果



d.  $1/\eta = 20 \text{ cm}$ の結果



e.  $1/\eta = 40 \text{ cm}$ の結果

図-3 地表での最大速度分布 (左: 断層直交水平成分、右: 断層平行水平成分、単位 cm/s)  
縦軸は断層直交方向、横軸は断層方向の距離 (単位 km)、下端の -10km から 10km の間が断層位置

して  $1/\eta$  が 10cm 以下の結果と似たパターンになっている。  $1/\eta$  が 40cm の場合には、速度最大となる所が 6 km 程度右にずれ、最大値も顕著に小さくなっている。

断層平行成分に関しても、  $1/\eta$  が 10cm 以下であれば 1 タイムステップで応力を低下させた場合とほとんど同じ結果であり、 20cm になると少し違いが見られるが概して 10cm 以下の結果と同様な結果となっている。一方 40cm になると、パターンに変化が見られる。

本解析では、破壊開始点及びその隣接点においては破壊後瞬間的（1 タイムステップ）に応力を低下させて計算しているが、実際の地震では、動的な破壊の前に初期破壊核が形成される。そして、その初期破壊核は（1）式の  $1/\eta$  の値が大きくなると大きくなる。今回の解析において、特に  $1/\eta$  を 40cm とした場合に断層の左側であまり地震動が生じていない結果については、このような地震の始まりのモデル化による影響がある可能性がある。

本解析に用いた応力降下量 100bar (10MPa) という値は、アスペリティーにおける値としては特別大きな値ではないこと、また、断層上での変位ではなく、半グリッドずれた点での変位を用いており、  $1/\eta$  の影響を過大に評価している可能性があることを考慮すると、  $1/\eta$  が 20cm 以下であれば 2Hz 以下の周波数の地震動についてはあまり影響を与えないといえる。今回の解析においては  $1/\eta$  が 40cm になると、地表で生じる速度の最大値が小さくなり、分布パターンにも顕著な変化が見られた。どの程度の値でどのような影響を与えるかについては、応力降下量や破壊伝播の状況によって変わってくると考えられ、また、最大速度分布パターンについては断層の深さによって大きく影響を受けることから、今回の解析だけからははっきりとしたことは言えないが、応力が低下するのに数十 cm 程度以上の滑りが必要な場合、地震動が小さくなるなどの影響が出る可能性がある。

## 結論

断層上で、破壊応力に達した後、すべり量に従って指数関数的に応力が低下するとして、この応力が低下するのに必要なすべり量の値が変わることで、地表の地震動にどのような影響が現れるかについて、応力降下量 100bar、上端の深さ 1km の長さ 20km × 幅 10km の横ずれ断層の場合について、2Hz 以下の周波数の地震動で検討した。その結果、必要なすべり量が 20cm 程度以下であれば、あまり影響はないが、数十 cm 程度以上になると地表で生じる地震動が小さくなるなどの影響が出る可能性があることが示された。

すべり量として断層上の点ではなく半グリッドずれた点を用いていること、また、地震の始まりのモデル化に

ついて検討を加える必要がある。さらに、地震波の解析から、応力が低下するのに必要なすべり量として 1m の値が得られている兵庫県南部地震における淡路島の地震動についても検討を加えていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) Miyatake, T.: Reconstruction of dynamic rupture process of an earthquake with constraints of kinematic parameters, *Geophys. Res. Letters*, Vol. 19, No. 4, pp. 349-352, 1992
- 2) 島田篤, 宮武隆, 谷山尚: 動力学モデルによる断層近傍の強震動, *地震*, 第49巻, pp.179-191, 1996
- 3) Ohnaka, M. and Yamashita T.: A cohesive zone model for dynamic shear faulting based on experimentally inferred constitutive relation and strong motion source parameters, *J. of Geophys. Res.*, Vol. 94, No. B4, pp. 4089-4104, 1989
- 4) Dietrich, J.H.: Time dependent friction and the mechanisms of stick-slip, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 116, pp. 790-806, 1978
- 5) Ruina, A.L.: Slip instability and state variable friction laws, *J. Geophys. Res.*, Vol.88, pp.10359-10370, 1983
- 6) Tse, S.T. and Rice, J. R. : Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties, *J. Geophys. Res.*, Vol.91, pp.9452-9472, 1986
- 7) Stuart, W.D. :Forecast model for great earthquakes at the Nankai trough subduction zone, *PAGEOPH*. Vol. 126, 619-641, 1988
- 8) 谷山尚, 宮武隆: 質点ばねモデルによる地殻内地震のシミュレーション, *Proceedings of the 9th Japan earthquake engineering symposium*, pp.685-690, 1994
- 9) 井出哲, 武尾実: 地震波解析から推定された断層すべりの構成関係, *日本地震学会講演予稿集*, No.2, A47, 1996
- 10) 坪井利弘, 三浦房紀: 有限要素法を用いた断層運動のシミュレーション, 第1回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp. 53-56, 1996
- 11) Virieux, J. and Madariaga, R.: Dynamic faulting studied by a finite difference method, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 72, No.2, pp.345-369, 1982
- 12) Clayton, R. and Engquist, B.: Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 67, No.6, pp. 1529-1540, 1977
- 13) 井上智広: 動力学モデルによる断層近傍の強震動分布予測, *東京大学理学系大学院修士論文*, 1996