寄 書

広域応力場の影響を考慮した dislocation model による 断層端での静的応力場

東海大学海洋学部*
楠 本 成 寿

Estimation of Static Stress Field at the Termination
of Strike-slip Fault by Means of Dislocation
Model with Regional Stress Field

Shigekazu KUSUMOTO
School of Marine Science and Technology,
Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu,
Shizuoka 424-8610, Japan

(Received November 6, 2001;
Accepted March 20, 2002)

§ 1. はじめに

dislocation model は地震やプレートの沈み込みに起因する地殻変動等で生じる地殻の歪みや変形を説明するモデル計算法として多用され、多くの成果をあげてきた[例えば、橋本, 1995; Ozawa *et al.*, 1999]. ここでいうdislocation model とは、弾性体中に仮定されたdislocation 面に対する解析解[例えば、Okada, 1985, 1992]の重ね合わせによって歪み場や変位場を求めるモデリング方法のことをさす。このモデリング方法は、断層面に直接変位を与えることで、断層運動に伴う変位場や歪み場を容易に計算でき、変動の本質を的確にとらえることができる。

しかし一方で、この方法には断層間相互作用や断層運動時に卓越していた広域応力場の影響を考慮した応力解析を行えないという欠点がある。断層間相互作用や広域応力場の影響を含めた解析には、それらを厳密に組み込んで計算出来る有限要素法や境界要素法を用いるのが早道であるが、モデルの構築やプログラミングに多少なりとも時間がかかる。

本論文では、断層運動により形成される応力分布に、無限遠方より作用する応力場を重ね合わせることににより、dislocation model に広域応力場の影響をもちこま

せることを試みた。

§ 2. 広域応力場の考慮

断層運動により形成される応力場と広域応力場の重ね合わせは、以下の方法によって行った。

まず、Okada (1985) などによる dislocation の解析解を用いて歪み場を求める。次に、平面応力状態を仮定し、地表面での歪みを応力 ($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$) に変換する。これにより、断層運動により形成される応力分布を得る。

一方、広域応力場は、無限遠方から媒質全体に均質に作用すると仮定し、 σ_1^∞ と σ_3^∞ として与えた。このとき、 σ_1^∞ の方位角も与えるため、方位角を用いて広域応力場 σ_1^∞ と σ_3^∞ をそれぞれ $\sigma_x^\infty, \sigma_y^\infty, \tau_{xy}^\infty$ に分解できる。dislocation model は線形弾性論にその基礎をおいているため、 $\sigma_x + \sigma_x^\infty$ など、断層運動により形成される応力と無限遠方から作用する広域応力場を重ね合わせることができる。これにより、dislocation model に広域応力場の影響を導入することができ、特定の広域応力場中で断層運動が生じた場合の断層端部の静的な応力場を見積もる事ができる。

§ 3. モデル計算

本来、dislocation は、広域応力場によるせん断力を解消するように発生するが、ここでは、断層運動後形成される応力分布が広域応力場の影響を受けてどのような分布になるかを調べるため、断層面に直接 dislocation を与えた。本論文では、横ずれ断層端での応力解析を行うため、極端に大きな応力集中が断層端に生じないように、小さな変位(横ずれ変位 2 cm)を与えた。断層は、地表に達する深さ 15 km、断層長 10 km の単一右横ずれ垂直断層を仮定した。一方、広域応力場として、 $\sigma_1^\infty = 25$ MPa、 $\sigma_3^\infty = 5$ MPa の圧縮応力を、断層と σ_1^∞ のなす角を $0 \sim 90^\circ$ まで変化させて与えた。最大圧縮応力と最小圧縮応力が 5:1 という比は、Segall and Pollard (1980) や Du and Aydin (1995) と同じである。また媒質の弾性定数として、ポアソン比 0.25、ヤング率 75 GPa を仮定し、計算には Okada (1985) の解析解を用いた。

§ 4. 計算結果と考察

計算結果を Figs. 1~4 に示す。各図の (a) は、最大せん断応力分布である。ここに示す最大せん断応力は、Fig. 4 を除いて、与えた広域応力場の最大せん断応力で規格化されている。各図の (b) は、計算により得られた応力場をクーロン破壊則により評価した、せん断破壊の発生推定領域と主応力の分布である。詳細は Segall and Pollard (1980), Jaeger and Cook (1969) に譲るが、断

* 〒424-8610 清水市折戸 3-20-1

Fig. 1. (a) Distribution of maximum shear stress $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$. Contoured values are normalized by far-field (regional stress field) maximum shear stress. Contour interval is 2.5. (b) Distributions of F -value and principal stresses. The strong extension field indicates the zone of potential tensile cracks. F -value indicates the zone of potential shear fracture. The shear fractures are formed when $F=1$. Illustrated contours are $F > 1$. Contour interval is 1. The regional stress field is assumed that $\sigma_1^\infty = 25$ MPa, $\sigma_3^\infty = 5$ MPa and θ (the angle between σ_1^∞ and fault) = 10° .

Fig. 2. (a) Distribution of maximum shear stress. Contoured values are normalized by far-field maximum shear stress. Contour interval is 2.5. (b) Distributions of F value and principal stress. Illustrated contours are $F > 1$. Contour interval is 1. The regional stress field is assumed that $\sigma_1^\infty = 25$ MPa, $\sigma_3^\infty = 5$ MPa and $\theta = 45^\circ$.

層運動により伸長場が卓越する方向に断層端から tensile crack が発生し、その後、 $F > 1$ の領域でせん断破壊が生じる [Segall and Pollard, 1980]. 各図の (b) から分かるように、伸長場が卓越する領域、すなわち、tensile crack の発生が予想される領域に $F > 1$ の領域が形成されている。このことは、静的変形が、断層端でせん断破壊を生じさせるとき、それは、断層運動によって形成された tensile crack を使って行われることを示していると考えられる。

また、Figs. 1~3 の結果から、最大せん断応力、主応力分布、 F 値分布は、広域応力の作用する方向によって大きく変化することが分かる。特に、断層と広域応力場の主応力軸 (σ_1^∞) のなす角度が 45° を超えるかどうか

で、主応力 (特に伸長応力) やせん断応力の分布パターンが大きく変化し、破壊発生領域も決定されてしまうため、断層と σ_1^∞ のなす角度は重要であるといえる。一方、Fig. 4 は外力を与えずに得られる最大せん断応力、主応力、 F 値分布である。Fig. 4 のうち、最大せん断応力、 F 値分布は、Fig. 2 に示される広域応力場の圧縮主軸と断層のなす角が 45° の場合とほぼ同じパターンであることが分かる。

このように、広域応力場の卓越方向により、断層端の応力場が大きく変化することから、特定の応力場中で断層運動が生じ、その静的応力場を dislocation model で議論する場合には、広域応力場の影響を考慮する必要があるといえる。

Fig. 3. (a) Distribution of maximum shear stress. Contoured values are normalized by far-field maximum shear stress. Contour interval is 2.5. (b) Distributions of F value and principal stress. Illustrated contours are $F > 1$. Contour interval is 1. The regional stress field is assumed that $\sigma_1^\infty = 25$ MPa, $\sigma_3^\infty = 5$ MPa and $\theta = 80^\circ$.

Fig. 4. (a) Distribution of maximum shear stress. Contour interval is 25 MPa. (b) Distributions of F value and principal stress. Contour interval is 1. The regional stress field is not introduced.

本論文で示した応力場の見積もりと破壊発生領域の評価は静的なものであり、破壊領域の推定に関しては、伸長応力によって形成される tensile crack に続いて生じる、せん断破壊の形成領域を見積もったものである。断層そのものの発達経路の推定などを扱うような動的解析ではない。実際、動的解析により得られる2次断層の発達経路推定〔例えば、Du and Aydin, 1995; Baud and Reuschle, 1997〕などとは異なる結果を得ている。初期破壊形成と、その後の2次断層の発達経路についての数値実験と実際の岩石圧縮試験結果は Shen and Stephansson (1994) や、Shen *et al.* (1995) に述べられている。

§5. ま と め

断層運動により形成される応力分布に無限遠方より作用する応力場を重ね合わせることににより、dislocation

model に広域応力場の影響をもちこませることを試みた。その結果、断層端に形成される主応力と最大せん断応力の分布は、広域応力場の作用する方向に依存することが明らかになった。また、断層端の局所応力をクーロン破壊則で評価したところ、破壊が生じる領域も広域応力場の卓越方向に依存していることが明らかになった。以上から、dislocation model により2次破壊領域の解析を行う際には、広域応力場の影響を組みこんだ解析を行う必要があるということが示された。

謝 辞

防災科学技術研究所の岡田義光氏ならびに匿名の査読者からいただいた適切なコメントにより、本稿は大きく改善されました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- Baud, P. and T. Reuschle, 1997, A theoretical approach to the propagation of interacting cracks, *Geophys. J. Int.*, **130**, 460-468.
- Du, Y. and A. Aydin, 1995, Shear fracture patterns and connectivity at geometric complexities along strike-slip faults. *J. Geophys. Res.*, **100**, 18093-18102.
- 橋本 学, 1995, 兵庫県南部地震に伴う応力変化: 断層モデルによるクーロン破壊関数の変化と地震活動の変化との比較, *地震* **2**, **48**, 521-530.
- Jaeger, J. C. and N. G. Cook, 1969, *Fundamentals of Rock Mechanics*, Methuen, London, 513 pp.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, 1135-1154.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.
- Ozawa, T., T. Tabei and S. Miyazaki, 1999, Interplate coupling along the Nankai Trough off southwest Japan derived from GPS measurements, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 927-930.
- Segall, P. and D. D. Pollard, 1980, Mechanics of Discontinuous Faults, *J. Geophys. Res.*, **85**, 4337-4350.
- Shen, B. and O. Stephansson, 1994, Modification of the G-criterion for crack propagation subjected to compression, *Eng. Frac. Mech.*, **47**, 177-189.
- Shen, B., O. Stephansson, H. H. Einstein and B. Ghahreman, 1995, Coalescence of fractures under shear stresses in experiments, *J. Geophys. Res.*, **100**, 5975-5990.