

大成建設 正員○西岡 巖
 京都大学工学部 正員 丹羽義次
 京都大学工学部 正員 広瀬壮一

1. はじめに

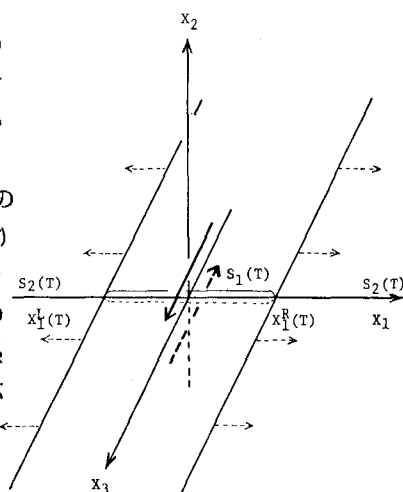
近年の地震学、及び工学においては、地震は震源となる断層上の変位のくい違いから発するものであるという考え方が定説である。この意味において、地震断層は地球規模のクラックとみなすことができ、地震波は、クラックで発生し伝播してくる弾性波と考えることができる。従ってクラックの動的挙動、並びにクラックより生じる弾性波を解析することは、破壊力学や非破壊検査の分野のみならず、地震学や工学上非常に重要な意義があると考えられる。本研究では、静的なクラックの解析に用いられている積分方程式法を動的な問題に拡張し、一様せん断力を受けるクラックの挙動、並びにクラックより生じる弾性波による変位、応力等を数値的に解析する。取り扱うクラックは、2次元面外せん断クラックとし、時間と共に破壊、伝播するものとする。

2. 面外せん断クラックモデル

まず時間 $t < 0$ ではクラックは存在せず、初期応力として一様のせん断力 $\tau_3 = \tau_0$ が存在すると考える。そして $t = 0$ において面外せん断クラックが瞬間的に発生し、このクラック内では初期応力 τ_0 からクラック面上の動摩擦力 τ_f に、応力降下するものとする。更に、このクラックは Fig.1 に示すように、時間と共に $x_2 = 0$ 面内を $\rightarrow$ のように x_3 軸に平行に伝播し、クラック領域 $S(t)$ は $x_1^L(t) \leq x_1 \leq x_1^R(t)$ ($x_1^L(0) = 0$)、 $x_2 = 0$ 、 $-\infty \leq x_3 \leq \infty$ とする。本研究で取り扱うクラックは $\rightarrow$ で示すように、変位の不連続が x_3 軸に平行に生じるものとする。以上のようなモデルを用いると、場の量は x_3 座標に無関係な為、 x_1 - x_2 平面内の2次元問題として扱え、応力の原点を初期応力状態 τ_0 にとると、初期条件、及び境界条件は次式のようなになる。

初期条件: $u_3(x, 0) = 0$, $\frac{\partial u_3}{\partial t}(x, 0) = 0$

境界条件: $\tau_3(x, t) = \tau_f - \tau_0$ ($x \in S_1(t)$)



ここで、 x は位置ベクトル、 t は時間、 τ_3 は応力、 u_3 は変位を表す。 Fig.1 面外せん断クラックモデル

3. 積分方程式の定式化

無限弾性体中に上記のようなクラック面 $S_1(t)$ が存在するとき、クラック面上において表面力の不連続が無いと仮定すると、クラック面上の応力ベクトル、クラック外の変位、並びに応力は、次式のように定式化できる。

$$\tau_3(\xi, t) = -pf \int_{S_1(t)} n_{\alpha}(\xi) \mu \frac{\partial}{\partial \xi_{\alpha}} T_3(\xi - x, t) * \Delta u_3(x, t) dS_x \quad \xi \in S_1(t) \quad (1)$$

$$u_3(\xi, t) = - \int_{S_1(t)} T_3(\xi - x, t) * \Delta u_3(x, t) dS_x \quad \xi \notin S_1(t) \quad (2)$$

$$\sigma_{\alpha 3}(\xi, t) = - \int_{S_1(t)} \mu \frac{\partial}{\partial \xi_{\alpha}} T_3(\xi - x, t) * \Delta u_3(x, t) dS_x \quad \xi \notin S_1(t) \quad (3)$$

ここで、 Δu_3 は変位の不連続、 $\sigma_{\alpha 3}$ は応力テンソル、 μ は Lamé の定数、 $n_{\alpha}(\xi)$ は ξ 点における単位法線ベクトル、 $*$ は合成積、 pf は発散積分の有限部分を表す。また、 $T_3(\xi - x, t)$ は二重層ポテンシャルであり、次のように表される。

$$T_3(\xi-x, t) * f(x, t) = \frac{1}{2\pi} n_\alpha(x) \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_r^{C_T t} f(x, t - r/C_T) \frac{dr}{(C_T^2 - r^2)^{1/2}}$$

ここに、 C_T は横波速度、 $r=|\xi-x|$ である。ところが、この積分核は時間と空間の特異性が混在しており、可積分ではない。そこで、本研究では石原¹⁾に従って時間と空間の特異性を分離し、さらにpf積分は解析的に評価した。

与えられた境界条件より、(1)式の左辺に示すクラック内の応力は既知であるため、まずこの式より未知量であるクラック内の変位の不連続を求める。そして、これを(2)、(3)式に代入すれば、クラック外の変位や応力が求められる。

4. 数値解析法、及び破壊基準

数値解析に際しては積分方程式を時間と空間に関してそれぞれ Δt 、 Δd 間隔で離散化し、各時間ステップ毎に解いた。また、未知量は線形近似により表わした。さらに、本研究においてはクラックの伝播過程として、等速伝播と、破壊基準に基く自発的伝播の2種類を考えた。用いた破壊基準は、クラック近傍の応力が与えられた極限応力 σ_u 以上になる位置まで次の時間ステップにおいてクラックが伝播するものである。

5. 数値解析結果、及び考察

本研究では様々な初期クラック長、クラック伝播過程(等速伝播、自発的伝播)、クラック伝播の限界長、クラック伝播方向(両方向、片方向)のクラックについての数値解析を行い、その結果よりクラック周辺の過渡的な変位場の特性を考察した。その一例として初期クラックが $-\infty < X_1 \leq 0$ 、 $-5\Delta d \leq X_1 \leq 0$ 、 $-\Delta d \leq X_1 \leq 0$ のいずれかにあり、等速 $C_T/2$ で片方向に伝播する3種類のクラックに対して、クラック面 $X_2=0$ 上での時間-変位関係の計算結果をFig.2~4に示す。Fig.2の case では既存の解があり²⁾、それと良く一致している。

また、Fig.2~4より、まず変位はクラック中央付近で最大値を示し、クラック先端付近ほど変位勾配が大きくなっている。そして有限長クラックの最大変位は一定時間 T 後(Fig.3では $T \approx 2\Delta d/C_T$ 、Fig.4では $T \approx 8\Delta d/C_T$ ：時間 T は初期クラック長が長いほど大きい値をとる)に定常状態となり、クラック長にほぼ比例して増大している。また、変位勾配は、定常状態になるまで半無限長クラックのそれと良く一致している。その他の特性については当日詳細に発表する。

〈参考文献〉 1) 石原洋二；京都大学卒業論文，1983。

2) Kostrov, B.V.; J. Appl. Math. Mech. (PPM), 28, 1077-1087, 1964.

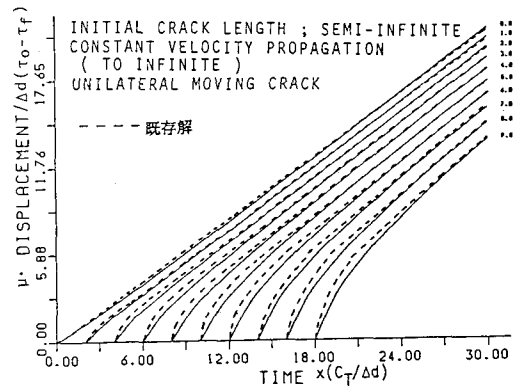


Fig.2 半無限クラック面上の過渡的変位挙動

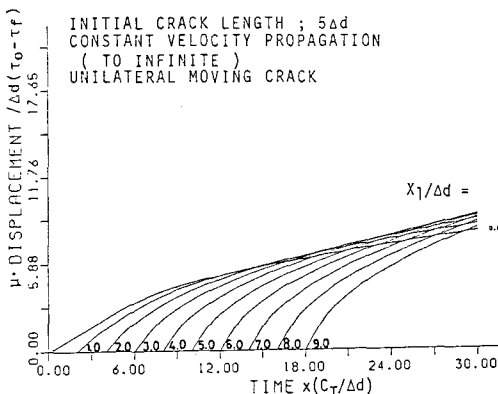


Fig.3 有限クラック面上の過渡的変位挙動

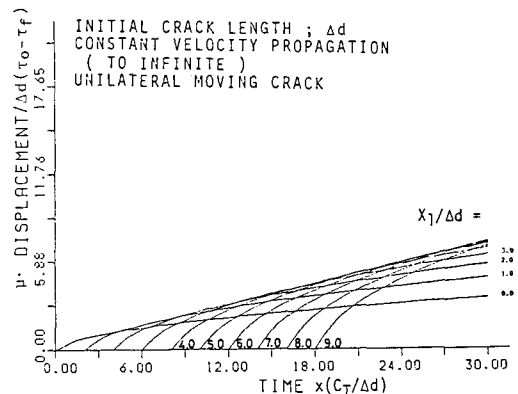


Fig.4 有限クラック面上の過渡的変位挙動