

Ⅲ-344

摩擦を考慮した屈折クラックを有する岩盤の応力変位解析

日本車輛製造(株) 正員 市江 保昭
名古屋工業大学 正員 長谷部 宜男
ヒメノコンサルタント 正員 中村 卓次

【はじめに】 本研究では、有理写像関数を用いて、圧縮荷重を受ける屈折クラックの、摩擦を考慮した解析を行う。硬質岩盤において、その材料となる岩石（不連続面やクラックを含まないもの）の荷重変位曲線は、ある荷重レベルまで線形で、弾性な挙動を示すのに対し、孔内平板載荷試験による硬質岩盤の荷重変位曲線は非線形となる。こうした硬質岩盤の変形特性を、圧縮荷重によって岩盤内の潜在クラック先端から、屈折クラックが発生、進展し、それにともない接触面で滑りによる摩擦が生じること等から説明しようとするものである。

【集中荷重を受ける外力境界値問題の一般解】 硬質岩盤内には一般に多くのクラックが潜在し、孔内平板載荷試験等によって荷重を与えると、クラック先端から引張応力により屈折クラックが、潜在クラックのほぼ直角方向に発生、進展する。屈折クラックは曲がりながら進展し、最終的には主応力とほぼ平行な方向となる。この屈折クラックを解析するモデルとして、図-1のような原点对称の多角形状で表された屈折クラックを考える。また、この形状を単位円外に写像する有理写像関数式(1)を用いる[1]。

$$z = \omega(\zeta) = E_0 \zeta + \sum_{k=1}^n \frac{E_k}{\zeta_k - \zeta} + E_{-1} \quad \dots\dots(1)$$

ただし、 E_0, ζ_k, E_k は、形状によって決まる係数、 E_{-1} は図形の平行移動を表す定数である。この写像関数は、パラメーター β, γ を与えることによって、任意の屈折クラック

長さ b/a を与え、メインクラック接触面の間隔 $\overline{OO'}$ を閉じさせ、 α によって屈折クラックの進展方向を任意に与えることができる。屈折クラックは、圧縮荷重下で図-2のように接触面で滑りを生じ、摩擦が発生する。いま、この接触面に生じる法線方向応力と摩擦力を、簡単のために接触面中央部に、それぞれ集中外力 $2afn, 2aft$ として与え、このモデルを集中荷重を受ける一様圧縮荷重下の外力境界値問題として解析する。

大きさ p で y 方向、大きさ q で x 方向の一様圧縮を受け、集中荷重 $2afn, 2aft$ が作用しているとき、外力境界条件を満足すべき $\phi(\zeta)$ は、次式のように求められる。

$$\phi(\zeta) = A_1(\zeta) + A_2(\zeta) - \sum \frac{B_k \overline{A_k}}{\zeta_k - \zeta} - \frac{p}{4} \omega(\zeta) - \frac{q}{4} \overline{\omega(\zeta)} + \text{const} \quad \dots\dots(2)$$

ただし、 $\phi_0(\zeta) = \phi(\zeta) + (p+q) * \omega(\zeta) / 4, A_k = \phi_0'(\zeta_k')$, $B_k \equiv E_k / \sqrt{\omega(1/\zeta_k)}$, $\zeta_k' \equiv 1/\overline{\zeta_k}$ で、 $A_1(\zeta)$ および $A_2(\zeta)$ は、次のように求められる。

$$A_1(\zeta) = \frac{1}{2\pi i} \oint \frac{H(\sigma)}{\sigma - \zeta} d\sigma = \frac{F}{2\pi} e^{i\theta} \log \frac{\sigma_1 - \zeta}{\sigma_2 - \zeta} \quad \text{ただし、} F = 2a(ft + ifn) \quad \dots\dots(3)$$

$$A_2(\zeta) = \frac{1}{2\pi i} \oint \left\{ \frac{p+q}{2} \omega(\sigma) + \frac{p-q}{2} \overline{\omega(\sigma)} \right\} \frac{d\sigma}{\sigma - \zeta} = \frac{p+q}{2} \sum \frac{E_k}{\zeta_k - \zeta} + \frac{p-q}{2} \frac{\overline{E_0}}{\zeta} \quad \dots\dots(4)$$

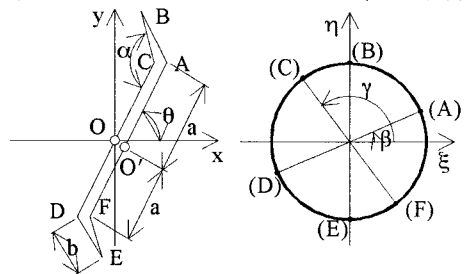


図-1 屈折クラックと単位円

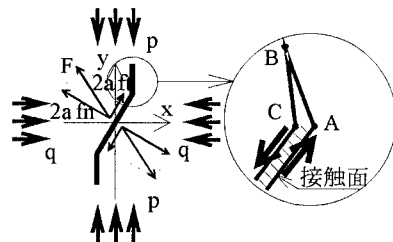


図-2 荷重を受けるクラックと接触面

σ_1, σ_2 は、それぞれ集中荷重を与える点 O, O' に対応する単位円上の座標である。また、自由境界上の解析接続より $\psi(\zeta)$ は、次式で与えられる。

$$\psi(\zeta) = -\overline{\phi(1/\bar{\zeta})} - \frac{\omega(1/\bar{\zeta})}{\omega'(\zeta)} \phi'(\zeta) \quad \dots\dots(5)$$

次に接触面での法線方向応力と摩擦力を考える。本解析では法線方向応力 f_n をモール円の法則より求め、その法線方向応力を用いてクーロン則より、単位長さ当たりの摩擦力 f_t を求める。

$$f_n = \frac{p+q}{2} + \frac{p-q}{2} \cos 2\theta = p \cos^2 \theta + q \sin^2 \theta \quad \dots\dots(6)$$

$$f_t = S_0 + \mu * f_n \quad \dots\dots(7)$$

ここで μ は摩擦係数、 S_0 は固有せん断強度で、これはせん断抵抗における粘着力に相当する力である。

【摩擦を考慮した屈折クラックの解析】 クラック先端での特異性を示す応力拡大係数 K_I は、 $\omega(\zeta), \phi(\zeta)$ を用いて計算され、図-3 に $\alpha = 100^\circ \sim 150^\circ$ の K_I と b/a の関係を示す。次に荷重変位曲線を求めるために、最大耐荷重 P を求める必要がある。各 b/a の屈折クラック形状を有する岩石が、耐える最大の応力拡大係数 K_{IC} に、 K_I が等しくなったときの荷重を最大耐荷重 P とする。いま、ここでは屈折クラックに一樣圧縮 p ($q=0$ の場合)、接触面法線方向応力 f_n と摩擦力 f_t ($S_0 = 0$ の場合) が働くすると、 f_n, f_t は p の関数となるため最大耐荷重 P は次式のように表される。

$$P = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a \{F_{Ip} + \cos^2 \theta (F_{IN} - \mu F_{It})\}}} \quad \dots\dots(8)$$

ここで、 F_{Ip}, F_{IN}, F_{It} は、それぞれ p, f_n, f_t による無次元化された応力拡大係数である。ここで求めた最大耐荷重 P を用いて荷重変位曲線を作成する。変位は、点 A の変位と点 C の変位の差を求めて全体の変位とする。一樣圧縮荷重 p に対して求められた変位量を用いて、最大耐荷重 P に対する変位は、 P/p を乗すればよい。こうして求められた荷重変位曲線から $\alpha = 100^\circ \sim 150^\circ$ で、各 b/a に対し、 K_I が最大となる部分の変位と荷重を選び出し、つなぎ合わせた荷重変位曲線を図-4 に示す。 h_y は点 A, C 間の y 方向変位を、 G は、せん断弾性係数を示す。

【まとめ】 硬質岩盤の孔内平板載荷試験による非線形な荷重変位曲線を求めるため、潜在クラックを有する弾性体に、 y 軸方向圧縮荷重を与え、屈折クラックが進展しながら変形したときの荷重変位曲線を解析により求めた。また、変形時の接触面の抗力として、クーロン則による摩擦力を考慮した。ただし、岩盤内の接触面に発生する摩擦力は、単純に、荷重に対し線形なものとは考えにくく、実際に則した摩擦則を見い出すことが必要である。

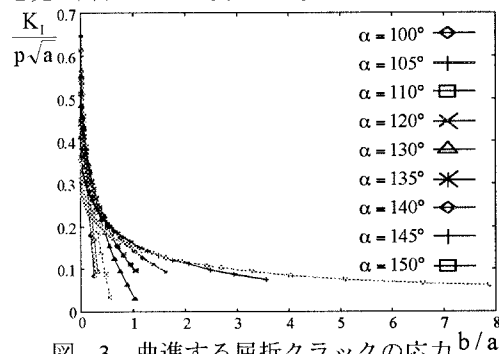


図-3 曲進する屈折クラックの応力拡大係数と b/a の関係 ($\mu = 0.5$)

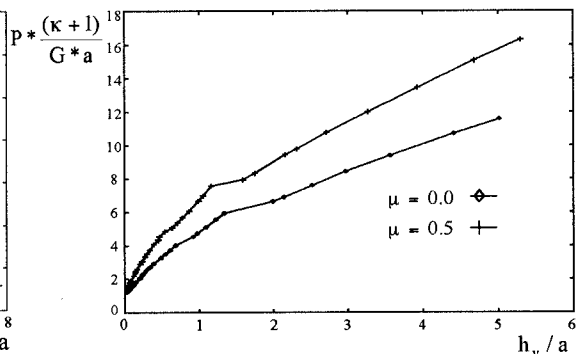


図-4 曲進するクラックの変位荷重曲線

【参考文献】 [1] Norio Hasebe and Sigeru Inohara, Engineering Fracture Mechanics Vol.14, No.13, pp607-616, 1981