

き裂材としての岩盤強度の破壊力学的考察

農林省林業試験場防災部 正員 ○陶山 正憲
東京大学大学院博士課程 結城 良治
東京大学生産技術研究所 北川 英夫

1. 序 論

近時、治山・砂防の分野においても、岩盤および岩石の力学的特性のより適確な把握に関心が寄せられている。岩盤・岩石は、ぜい性かつ欠陥を含む材料または広義の構造物であるから、その強度解析の有効な一手法として破壊力学 (Fracture Mechanics) を採用し、本報では若干の破壊力学モデルの提案を含めて、その通用方法と問題点の基礎的検討を行なった。

2. ぜい性不均質材料・構造物としての岩盤・岩石への破壊力学の適用の問題点について

一般に岩盤・岩石は、その応力条件と拘束によっては強度的に弱いぜい性材料の特性を示す。これは岩盤または岩石中に、き裂または力学的にき裂と等価と見なされる不連続部を含むことが、その主たる理由の一つと考えられる。例えば、岩盤レベルのサイズにおける断層、節理、層理、片理や岩石試験片レベルのサイズにおける造岩鉱物、結晶粒界、空隙などがそれである。欠陥材の強度は一般に、欠陥の大きさ、形状、方向、位置、相互干渉などによって変化するものと考えられる。従来の岩盤・岩石強度の解析法、すなわち滑り摩擦に関するCoulomb、Rankine 則とMohr 基準、き裂の分布確率に注目したWeibull の方法、楕円き裂の寸法と傾斜を考慮したGriffithの方法などのみでは、その正確な評価は難かしいかと思われる。現在これを解決できる可能性をもつ唯一の方法論として破壊力学の手法が考えられるので、その適用性について検討してみよう。

まず、岩盤または岩石を材質的にはぜい性体と考え、更にこれをき裂を含んだ連続体とみなせば、岩盤・岩石強度への破壊力学の適用が原理的には可能になるが、計算された応力拡大係数 (Stress Intensity Factor, K) のいかなる関数に破壊が支配されるかは実験によって確認しなければならない。

次に破壊力学では、一般にき裂をモデル化し、その単純なモデルに対する K の値を実在の欠陥に適用するのである。ここでは、岩盤・岩石に存在する複雑な欠陥を、破壊力学の特異点をもつ等価な線状または面状の各種の理想き裂に置き換えて破壊力学の手法の適用を試みる。

最後に、岩盤・岩石強度への破壊力学の手法の適用については、岩盤・岩石は元来均質な連続体ではなく、一種の分散形複合体であるので、これを巨視的に連続体として取扱うには実験的保証が要求される。その一例として、本報上岩盤・岩石に近似できるかと思われるセメントモルタルによる破壊強度試験例¹⁾を示す。

この実験は、金属の平面ひ

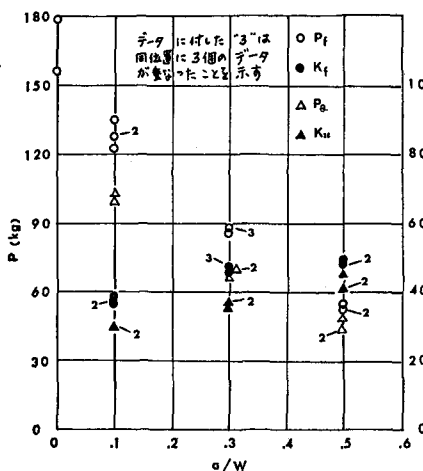


図1. 欠陥の寸法とモルタル強度

$$(B=W/2, S=4W, W=8\text{cm})$$

P_f, K_f は破壊時の荷重および応力拡大係数
 a : き裂長さ, W : 試験片高さ, S : スパン, B : 板厚

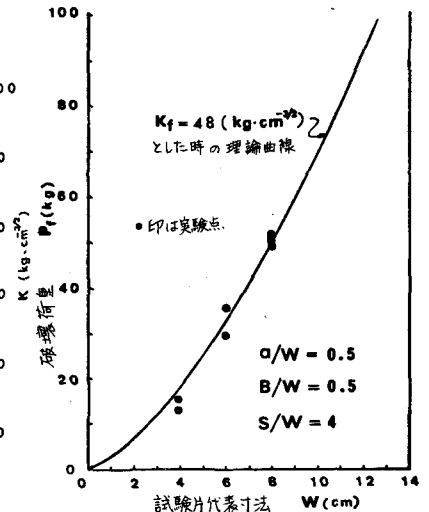


図2. 相似試験片の寸法が破壊荷重にお

よぼす影響の計算値と実験値の比較

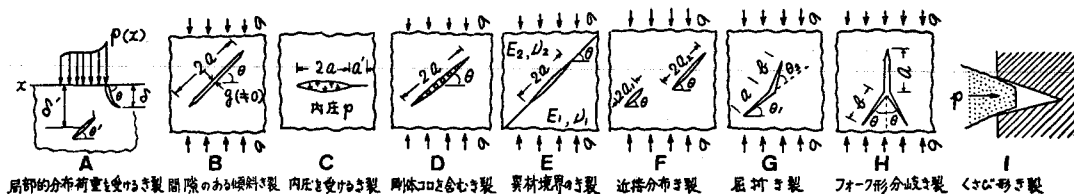


図3. 岩盤・岩石の破壊力学的解析のために提案した単位き裂モデル

ずみ破壊靱性試験法²⁾を準用して行なったものであるが、その結果次の2点が明らかになった。

① き裂の寸法を変えると、モルタルの荷重(P)基準強度は当然変わるが、K基準強度は、 a/W (a =き裂長さ、 W =試験片高さ)の差の影響を受けることが少なく、ほぼ一定値として得られた。従って材料定数としての強度値としては、PよりKの方が格段に優れていることが結論できる(図1)。

② 相似形の試験片で、その寸法を変えると、P基準の強度は試験片の寸法効果の影響を著しく受けるが、K基準強度では寸法効果の影響をあまり受けなかった。図2には試験片の代表寸法(W)と破壊荷重の関係を示す。

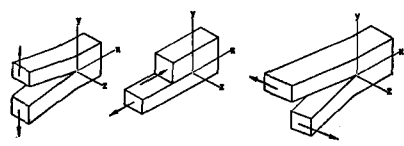
以上の事実から、岩盤・岩石のようなぜい性不均質材料へも第一次近似的には破壊力学の適用の可能性が予想される。なお問題点として、岩盤・岩石とモルタルとの間では欠陥の条件や不均質の程度の相違が考えられるが、この点についても順次検討して行きたい。ここでは材質的には岩盤・岩石にも破壊力学が適用できるものとして、岩盤・岩石に特有の複雑な先天欠陥を、まず若干の基本的なモデル単位き裂に分割・置換して考察することから始める。

3. 岩盤・岩石の各種欠陥に対する単位破壊力学モデル

破壊力学の重要なパラメータであるKは、き裂先端傍での弾性域応力分布を一義的に決定する工学量であり、き裂の伝播方向、伝播開始条件、成長特性などを支配すると言われている。このKの解析方法として現在までに等角写像法、選定法、有限要素法、ローラン展開法などが開発され、多くの解析結果が得られている。

さて、破壊力学は単純化されたき裂モデルの解析によって得られたパラメータ(例えばK)を用いて、実際の破壊現象を特徴づける方法論であると考えられるので、このモデルの選択、設定が重要な問題となる。従来は、ほとんど単一直線き裂のような単純なモデルを使用して議論されてきたが、岩盤・岩石における複雑な力学的境界条件を考慮すれば、き裂モデルの精密化を進める必要性が生じてくる。実在の岩石や特に岩盤では、等価き裂は極めて複雑であるから、その解析には単位モデルの設定、それら単位モデルの集成、確率過程的処理などの過程を順次たてることが必要となろう。ここでは、その第1段階として、岩盤・岩石の破壊力学的解析に重要であると思われる単位き裂モデルを提案し、それらを図3に列記する。

ここに図示したき裂モデルに対しては、未だKが解かれていないものも数多く含まれている。しかしながら、このような単位モデルに分解し、モデルを精密化することによって、



モードI 開口形 (K_I を生じる) モードII 面内すべり形 (K_{II} を生じる) モードIII 面外すべり形 (K_{III} を生じる)
図4. 特異性をもつき裂の変形モード

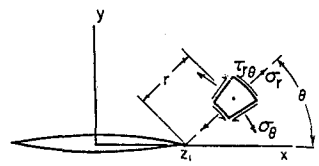


図5. き裂先端近傍の応力成分の表示法

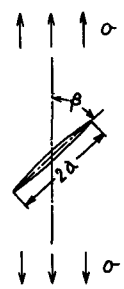


図6. 傾斜き裂の形状

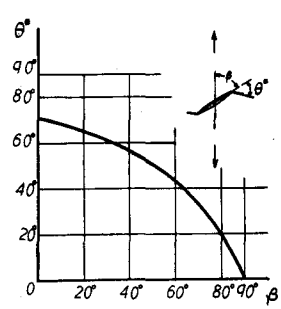


図7. 傾斜き裂からのき裂伝播方向と傾斜角との関係 (引用文献3参照)

現実の岩盤・岩石の複雑な破壊現象の解明への一つの道を開くことも可能であると考えられる。ここでは、上記のき裂モデルの中から数例を取り上げて解析方法を述べる。これらのモデル化されたき裂は、それぞれ特有の挙動・特性をもつが、その解析には破壊力学的手法を用いるのが適当であると考えられる。その適用の結果により、破壊力学の有効性も保証されよう。

4. 傾斜き裂および屈折き裂の伝播方向

現実の材料中に存在する先欠陥は、必ずしも主応力方向に直角に位置するとは限らず、二次元応力状態下においては一般に、モードⅠ、Ⅱの二つのモードが混在する(図4参照)。このような場合、き裂はその延長線の方に直進せず、一般には曲進または屈進する。このような混合モード下におけるき裂の伝播方向に関しては、最近種々の理論^{3,4,5)}が発表されている。ここでは、Erdogan 等³⁾が示したき裂端最大周方向応力説を適用し、上記の問題を検討する。

これは“き裂先端における周方向応力(σ_θ)が最大になる方向へき裂は伝播を開始する”という説である。この理論を、き裂先端近傍における応力分布について、 K を用いて定式化すると、き裂伝播方向 θ^* は次式となる(図5)。

$$K_I \sin \theta^* + K_{II} (3 \cos \theta^* - 1) = 0 \quad (1)$$

この式に K_I 、 K_{II} を代入すれば、き裂伝播方向が決定される。

4-1. 傾斜き裂

傾斜き裂の1例を図6に示す。傾斜き裂の K は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} K_I &= \sigma \sqrt{\pi a} \sin^2 \beta \\ K_{II} &= \sigma \sqrt{\pi a} \sin \beta \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

これを(1)式に代入すれば、傾斜角 β とき裂伝播方向 θ^* との関係は図7で示される³⁾。この関係は、 β が特に小さくない範囲では実験結果に比較的良好に一致している。

4-2. 屈折き裂

図8に示すような屈折き裂の K は筆者らの解析で明らかになった⁶⁾。このき裂モデルも、き裂伝播形態を考える上で重要なモデルと思われる。屈折き裂から発生するき裂の伝播方向を(1)式を用いて計算し、結果として図9を得た。この図からも明らかなように、屈折き裂からのき裂の伝播方向は、引張方向に対してほぼ直角になる。

5. 分布き裂の相互干渉と合体

岩盤・岩石には多数の欠陥、弱面などが不規則に分布していると考えられるので、分布き裂の干渉、合体が供試材の強度低下あるいは破壊におよぼす影響を検討する必要がある。このような分布き裂の二次元的モデルについては、石田のローラン展開と摂動法による解析例⁷⁾があり、これによって任意荷重の任意配置・寸法の分布き裂の K の計算が可能になった。さて、分布き裂の特性を論じる場合、重要な基本モデルとして“平行2き裂モデル”を例にとり、このモデルについて検討する。まず、等長平行2き裂の無次元応力拡大係数($F_{IA} = K_{IA} / \sigma \sqrt{\pi a}$)についての石田の解を図10に示す。この解析方法を用いて北川らは、平行2き裂の干渉を、相手き裂の左端の位置で

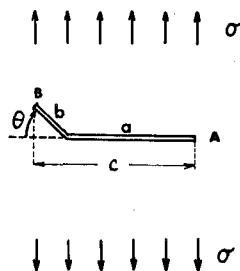


図8. 屈折き裂の形状

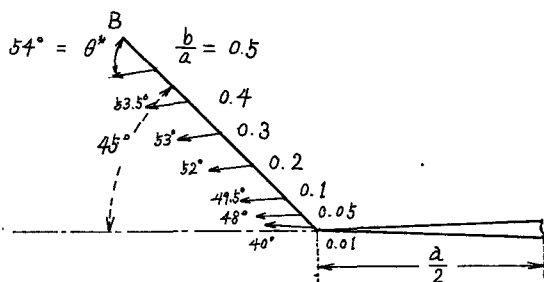


図9. 屈折き裂からのき裂伝播方向

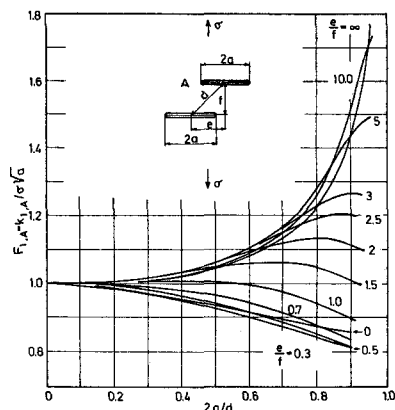


図10. 平行等長2き裂の応力拡大係数 (引用文献7参照)

整理し、図11に示すような干渉線図を得た。⁸⁾ 図から、同一直線上にあるき裂配置よりも、ある程度斜めのくい違い配置の方が、2き裂間の干渉・加速開始が早いことになり、これはぜい性材料でわれわれがしばしば経験する所である。また K_{II}/K_I の比が十分大きくなるのは互にオーバーラップしてからである。従って、接近したき裂は最短距離で連結することなく、互に平行に伝播し、オーバーラップ後、 K_{II}/K_I が増加し、方向を転じて連結の方向へ向うことになる（図12）。このような割れ方もぜい性材料ではしばしば見られる例であり、破壊力学でよく説明できる。2き裂が接近すると K_I (または f_I) は増加するが、2き裂が十分オーバーラップするような配置においては、 K_I の減少もありうるということが認められた。

一般に複数個のき裂が不規則に分布する材料においては、分布密度が或る程度大きくなると、まず危険な配置にある二つのき裂が干渉し、合体に至る。次に合体によって伸長したき裂は更に周囲のき裂と合体し、次第にき裂は長くなり、終に連鎖的に急速破断に至るような破壊過程が考えられる。このような破壊過程の理論的解明には、線形破壊力学 (LFM) および実験によって確認された幾つかの仮定を導入した統計的シミュレーション法も有効な手段の一つと考えられるが、これについては多数の分布き裂を生じる金属の腐食疲労によく適用した実例⁹⁾があり、この手法は岩盤・岩石にも転用できよう。

6. 分岐き裂のアレスト効果

ぜい性破壊、応力腐食割れなどで、き裂端が複数個に分岐する現象が知られている。これを分岐き裂と呼び、その基本的なモデルとして、一端が対称に分岐したフォーク形き裂の K を解析した。これを図13に示す。⁶⁾ その結果をみると、分岐き裂の特性として次の事が明らかにになった。まず、分岐端の応力拡大係数 (K_{IB} または K_{IIB}) は直線き裂の K に比較して小さな値となる。一度分岐が生じるとき裂の成長速度の減少あるいは停止が起る現象 (クラックアレスト効果) をこれによって説明できる。次に、分岐角 (2θ) が 30° 付近で $K_{IIB} = 0$ となり、 $K_{II} = 0$ の場合にのみき裂端の左右の応力状態が対称であり、その前後では K_{II} の符号の逆転が生じている事実から、き裂は $K_{II} = 0$ の方向へ進行すると考えれば、実際に観察される一様引張下におけるき裂分岐の分岐角が、ほぼ 30° 前後のものが多くいることを説明できる。⁵⁾

7. むすび

このような単位き裂モデルについて、そのパラメータ (K など) の解析と、そのパラメータを用いてのき裂の特性付けを進めれば、次の段階でのこれらのモデルの集合体の解析、または、それらのモデルの確率的な選択と配置による継続発生現象への道が開かれるかと思われる。

引用文献

- 1) 北川英夫, 陶山正憲: 土木学会関東支部大会講演集, 1975.
- 2) ASTM Standard, Part 31, E399-70T, 1970.
- 3) F. ERDOGAN, G. C. SIH: Trans. ASME, Ser. D. J. Basic Engr., (85), P.525, 1963.
- 4) G. C. SIH: Engr. Frac. Mech., (5), P.365, 1973.
- 5) H. KITAGAWA, R. YUUKI: Proc. of Japan-U.S. Seminar, (Sendai), 1974.
- 6) 北川英夫, 結城良治: 機械学会講演論文集, No.740-11, P.171, 1974.
- 7) M. ISHIDA: Methods of Analysis and Solutions of Crack Problems, Mech. of Frac. 1, Noordhoff Int. Pub. Leiden, P.56, 1973.
- 8) 北川英夫, 薄一平: 機械学会講演論文集, No.740-10, P.227, 1974.
- 9) 北川英夫, 薄一平: 精機学会東北支部仙台地方講演論文集, No.741-2, 1974.

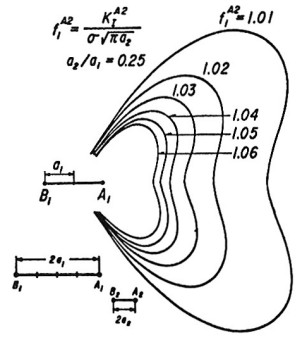


図11. 平行2き裂の干渉線図 ($a_2/a_1 = 0.25$)

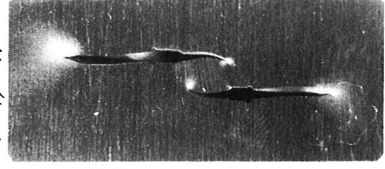


図12. 疲労試験における平行2き裂の合体写真

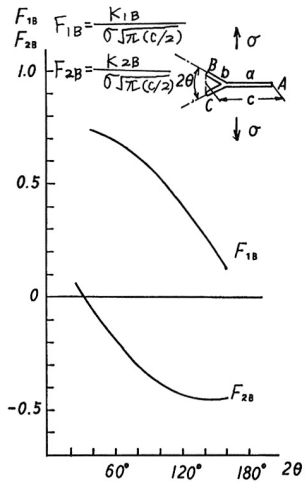


図13. フォーク形き裂の応力拡大係数と分岐角との関係 ($b/a = 0.1$)

Fracture Mechanics Approach to the Strength of Rock
as the Cracked Body

Masanori Suyama^{*}

Ryoji Yuuki^{**}

Hideo Kitagawa^{***}

Rock can be regarded as the brittle structure containing some defects or cracks. Therefore, fracture mechanics seems to be a useful methodology to analyse the strength of rock. In this paper, we represent the experimental results of fracture toughness tests of cement mortar specimen and investigate the applicability of fracture mechanics, theoretically and experimentally.

In fracture mechanics, the selection or determination of crack models has very significant meanings. We propose several fundamental crack models based on fracture mechanics, applicable to rock mechanics, and take up a few crack models in them as shown in the followings and discuss their behavior and characteristics.

1. The direction of the crack propagation from a slant crack and a folded crack.
2. The interaction and coalescence of plural cracks.
3. The crack arresting effects of a branched crack.

* Government Forest Experiment Station, Ministry of Agriculture and Forestry.

** Tokyo University, Institute of Industrial Science.

*** Tokyo University, Institute of Industrial Science; Professor.