HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	凍結融解作用を受ける泥質片岩の破壊プロセスに関する破壊力学的手法による考察
Author(s)	児玉, 淳一; 福田, 大祐; 藤井, 義明
Description	資源・素材学会平成29(2017)年度春季大会、2017年3月27日（月）～29日（水）、千葉工業大学 津田沼キャンパス、習志野市
Citation	資源・素材学会春季大会講演集, 2017, 3401-10-02
Issue Date	2017-03-27
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/65420
Type	conference paper
File Information	MMIJ2017.3401-10-02.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

一般講演
岩盤力学
2017年3月29日(水) 09:00 ～ 11:45 第４会場 (6号館 2階 622講義室)

[3401-10-02] 凍結融解作用を受ける泥質片岩の破壊プロセスに関する破壊力学的手法による考察
Consideration of fracture process of argillaceous schist subjected to freeze-thaw cycles based on fracture mechanics

○児玉 淳一[1]、福田 大祐[1]、藤井 義明[1] （1. 北海道大学）
○Jun-ichi Kodama[1], Daisuke Fukuda[1], Yoshiaki Fujii[1] （1. Hokkaido University）

キーワード：泥質片岩、凍結融解、破壊プロセス、破壊力学、き裂進展
argillaceous schist, freeze-thaw cycle, fracture process, fracture mechanics, crack growth

筆者らは片理が発達した泥質片岩を対象に凍結融解試験を実施し，ひずみの計測やX線CTによる観察からその破壊プロセスについて検討してきている。そして，凍結融解サイクルとともにき裂は徐々に進展するが，このき裂の進展はある特定の片理面に沿ってのみ見られることを明らかにしている。本研究では，上記の試験結果を力学的に解釈するために，泥質片岩中の片理面を複数の平行な片側き裂としてモデル化し，凍結時にこれらのき裂に膨脹圧（内圧）が作用するものと仮定して応力拡大係数の評価を行い，き裂の進展挙動について考察した。その結果，き裂長さと作用内圧がともに等しいときには，自由表面に近いき裂の応力拡大係数が最も大きくなること，一つのき裂が進展していくとその近傍のき裂の応力拡大係数は低下していくことなどを見出した。これらのことは，凍結融解作用により自由表面に近いき裂が進展しやすいこと，一つのき裂が進展し始めると他のき裂は進展しづらくなることを意味しており，破壊力学的な手法により泥質片岩の破壊プロセスの解釈が可能であることを示している。

©一般社団法人 資源・素材学会

1. はじめに

筆者らは，片理が発達した泥質片岩を対象に凍結融解試験を実施し，ひずみの計測[1)]やX線CTによる観察[2)]などからその破壊プロセスについて検討してきている。そして，凍結融解の繰返しによりき裂は徐々に進展するが，き裂の進展はある特定の片理面に沿って起きることを明らかにしている[2)]。本研究では，上記の試験結果を力学的に解釈するために，泥質片岩を複数の平行な片側き裂を有する弾性体としてモデル化し，2次元有限要素解析を行った。そして，き裂の内面に内圧が作用するときの応力拡大係数を評価し，応力拡大係数に与えるき裂の位置，密度，長さの影響について検討したうえ，泥質片岩のき裂進展挙動に関して考察を行った。

2. 解析方法

2・1 解析モデル

既往の研究[2)]で用いられた泥質片岩の供試体の寸法を参考に，Fig.1のように幅と高さがともに50mmの直方体の2次元解析モデルを作製した。き裂はモデルの上面から入っているものとし，クラック長やクラック数（クラック密度）が異なる複数のモデルを用意した。そして，モデルの底面上のすべての節点の垂直方向の変位を固定してクラックの内面に単位大きさの等分布荷重を与え，応力拡大係数に及ぼす以下の影響について検討した。なお，モデルの左下の角の節点では水平方向の変位も固定した。

(1) 内圧の負荷形態の影響： Fig.1に示す5つのき裂があるモデルとFig.2に示す中央部に一つのき裂があるモデルを用いて，き裂長さaを10,20,30mmの3ケースに設定し，き裂長さの影響について検討した。また，Fig.2のモデルに対しては，(a)のようにき裂の内面すべてに荷重を与える場合と，(b)のように表面から10mmの深さまでに荷重を与える２つの解析を行い，内圧の作用形態の違いについても検討した。

(2)き裂の位置の影響： Fig. 2とFig.4のモデルを用いてき裂の位置による影響について検討した。き裂長さは10mmとした。

(3)き裂の数（き裂密度）の影響： Fig.1とFig. 3 (a), (b)のようなき裂の数や分布が異なるモデルを用いた，き裂長さaは10mmとした。

(4)特定のクラックの進展の影響： Fig. 5(a),(b)に示すように，5つのき裂のうち，それぞれ側面から5mmの位置と25mmの位置（中央部）にあるき裂の長さaを10mm，15mm，20mmに設定して，すべてのき裂の応力拡大係数を評価した。ただし，伸長するき裂以外ではき裂の長さを10mmとした。

2・2 応力拡大係数の評価方法

モデルの厚さを単位厚さとし，全エネルギー法[3)]により応力拡大係数を評価した。具体的には，各モデルに対して，応力拡大係数K_Iを評価したいクラックの先端を0.1mmだけ伸ばしたモデルも作成し，両モデルにおける等分布荷重による仕事の差からクラックの進展に伴うエネルギー解放率G_Iを計算した。そして，平面ひずみ状態を仮定し，次式によりルギー解放率から応力拡大係数を評価した。

$$K_I = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2}G_I} \tag{1}$$

ここでEとνはヤング率とポアソン比であり，それぞれ1GPa，0.20として計算を実行した。

解の精度を確かめるために，今回と同様な粗さで要素分割を行い，中央に単一クラックを有する長方形板が一様な引張応力を受けたときの応力拡大係数を評価した。その結果，解析解（石田の解[3)]）との差は2%以内にあり，今回の解析方法には十分な精度があることを確認した。

応力拡大係数の大きさは，当然ながらき裂面に作用する等分布荷重pの大きさに依存する。このため，すべての解析におけるpの大きさを等しくし，各モデルのそれぞれのき裂の応力拡大係数は，特に断らない限りFig.2(a)に示す中央き裂の応力拡大係数に対する比で表すことにした。本稿では，このように正規化して表した応力拡大係数を単に応力拡大係数と呼びK_I^*と書く。

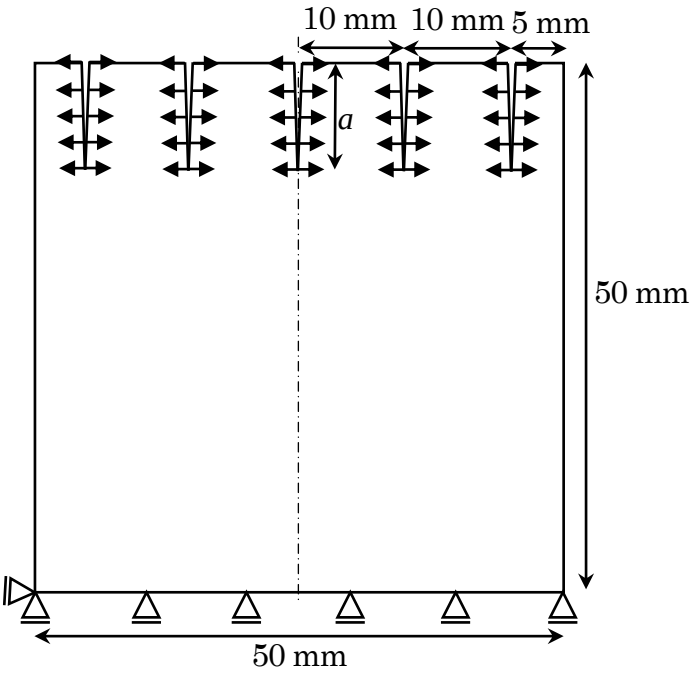
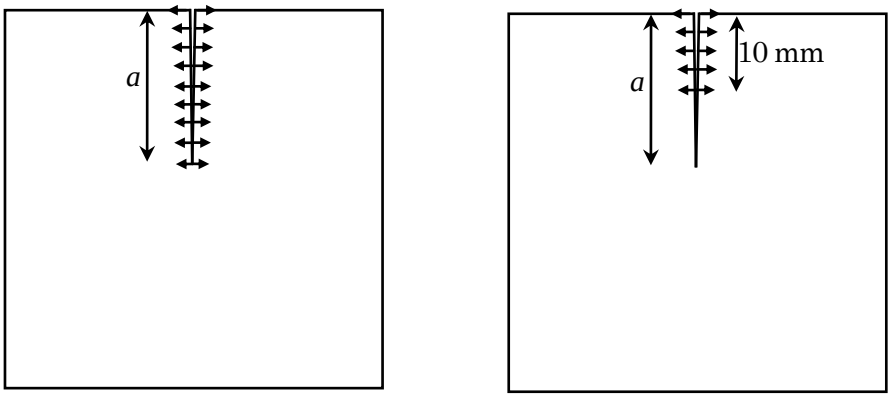
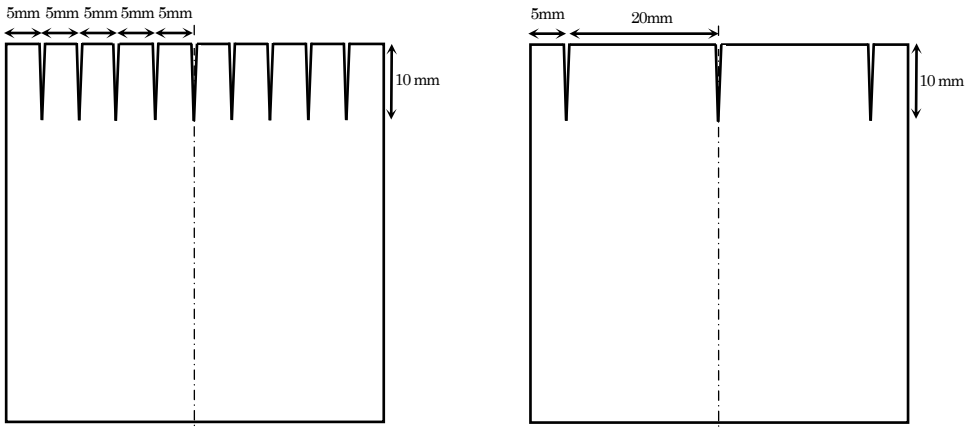


Fig. 1 Dimension and boundary conditions of numerical



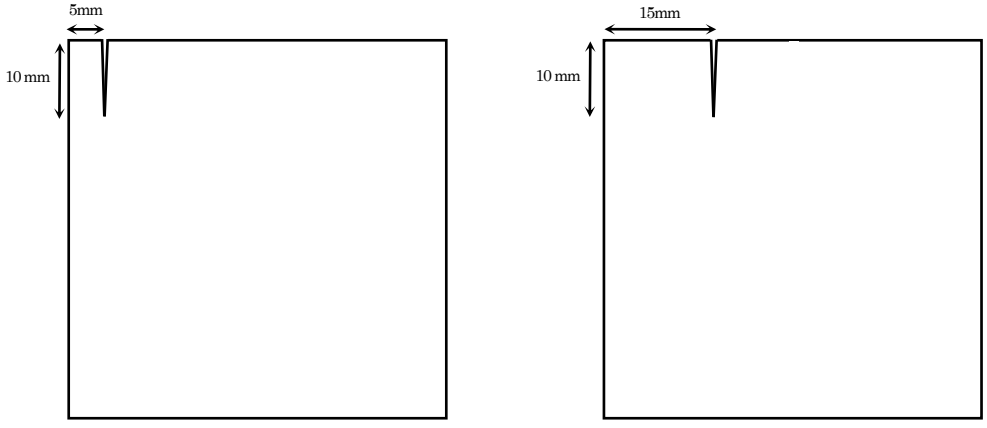
(a) Full internal pressure (b) partial internal pressure

Fig. 2 Numerical models with single crack at the center. Full or partial internal pressure is applied to the crack surfaces.



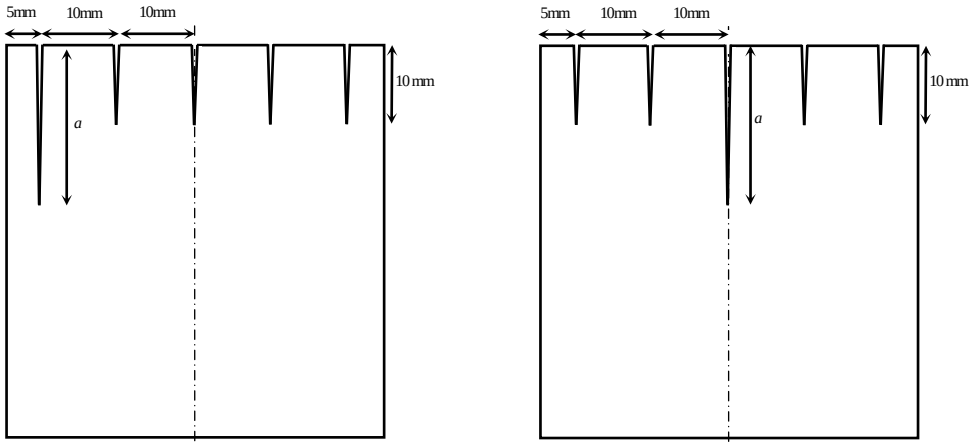
(a) 9 cracks (b) 3 cracks

Fig. 3 Numerical models with 9 or 3 cracks



(a) 5 mm (b) 15 mm

Fig. 4 Numerical models with single crack at the distance of 5 mm or 15 mm from the left side surface



(a) Growth of edge crack (b) Growth of center crack

Fig. 5 Numerical models with 5 cracks. Length of an edge crack or a center crack is increased.

3. 解析結果および考察

3・1 内圧の負荷形態の影響

Fig.2 中のき裂の応力拡大係数 K_I^* を Fig. 6 に示す。き裂長さ a によらず，表面から 10mm の範囲にしか等分布荷重が作用しない場合は，a が 10mm と 20mm のときの K_I^* には差異は見られず，a = 30mm になると約 1.3 倍になる。一方，き裂内面のすべてに等分布荷重が作用する場合，すなわち，き裂が長くなると分布荷重の作用範囲も広くなる場合は，a の増加により K_I^* は明らかに増加し，a = 30mm のときの K_I^* は a = 10mm のときの K_I^* の約 3.3 倍となる。水分の供給が十分な状態において凍結融解作用によりき裂が伸長する場合は，後者のケースに近くなると考えられるが，この場合の応力拡大係数の評価には，き裂の伸長に応じて作用内圧を変える必要がある。後述する解析結果では（Fig.7-9）はき裂内面のすべてに等分布荷重を与えた場合の結果である。

3・2 き裂の位置と密度の影響

Fig.4(a),(b)と Fig.2(a)の位置にある a = 10mm の単一き裂の応力拡大係数 K_I^* を Fig.7 中に●で示す。図の横軸は側面からき裂までの距離であり，25mm の結果は中央部にあるき裂を示している。側面から 5,15,25mm の位置にあるき裂の K_I^* はそれぞれ，約 2.3,約 1.15, 1.0 であり，き裂の位置が側面に近づくと K_I^* は指数関数的に増加することがわかる。

複数のき裂がある Fig.3(a),(b)と Fig.1 に示したモデル中のき裂の応力拡大係数 K_I^* を Fig. 7 中に示す。き裂長さはすべて 10mm であり，き裂の分布の対称性のため中央より左側のき裂の結果のみを示している。図より，複数のき裂が分布する場合でもき裂の位置が側面に近づくにつれ，K_I^* が指数関数的に増加することがわかる。また，この増加の程度はき裂の密度の影響を受けず，上述した単一き裂の結果とほぼ同じである。

Fig. 8 は Fig.1 に示したモデルにおいて，き裂長さが 10mm, 20mm, 30mm のときの応力拡大係数を示したものである。き裂分布の対称性を考慮して中央部から左に位置する 3 つのき裂の結果のみを示している。ただし，a = 10mm, 20mm, 30mm の応力拡大係数は，それぞれの長さのき裂が中央に一つだけ存在するとき（Fig.2(a)）の応力拡大係数（Fig.6）で正規化している。a=10mm のときの結果は Fig.7 に示したものと同じである。図より，a=20mm, 30mm のときも，a = 10mm のときと同様に，き裂位置が側面から 5mm の応力拡大係数が他の位置の値より大きくなっていることがわかる。また，この増加の程度はき裂の長さに依存し，a が大きいほど大きい。

以上のことより，応力拡大係数に影響を与えるのはき裂の位置であり，長さと内面に作用する力が等しい場合には側面に近いき裂ほど応力拡大係数は大きくなること，この影響はき裂が長いほど大きいこと，き裂の密度の影響は小さいことがわかる。

3・3 特定のき裂の進展に伴う応力拡大係数の変化

5 つのき裂のうちのある一つのき裂が伸長したときの（Fig.5）の応力拡大係数の変化を Fig. 9 に示す。図の横軸は伸長するき裂の長さであり，その他のき裂の長さは 10mm のままである。図中，5mmL や 5mmR などの L と R はそれぞれ，モデルの左側面と右側面からの距離であることを示している。

5mmmL のき裂が伸長した場合（Fig.9(a)），このき裂の応力拡大係数 K_I^* は大きく増加し，a=20mm のときの K_I^* は a=10mm のときの値の約 4 倍となる。しかし，その他の伸長しない 4 つのき裂の応力拡大係数には大きな増加が見られない。25mm と 15mmL の K_I^* は低下傾向を示し，低下の程度は伸長したき裂に近い 15mmL の方が大きい。モデル中央部の 25mm のき裂が伸長した場合（Fig.9(b)），このき裂の応力拡大係数 K_I^* は増加する。しかし，5mmR と 5mmL の K_I^* はほとんど変化せず，伸長したき裂に近い 15mmR と 15mmL の K_I^* は低下する。以上のことから，ある特定のき裂が伸長するときには，もっぱらそのき裂の応力拡大係数が増加し，その近傍のき

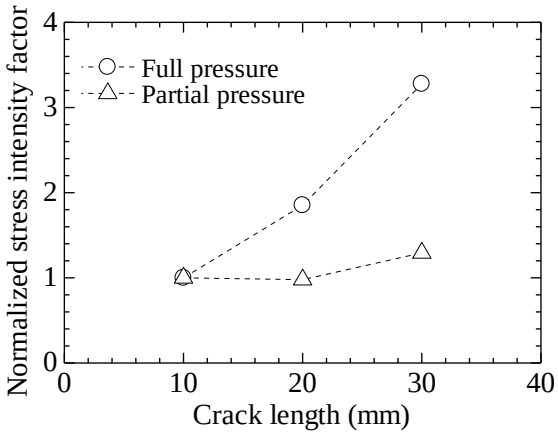


Fig. 6 Effect of internal pressure conditions along the crack surface on stress

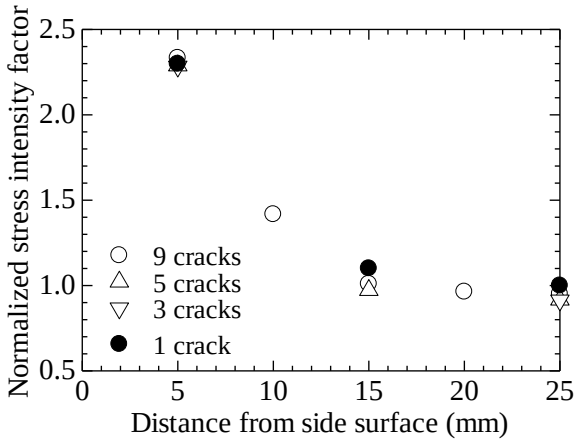


Fig. 7 Effect of crack location and density on stress intensity

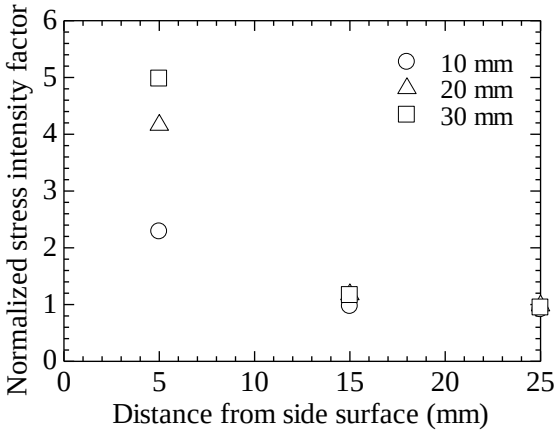
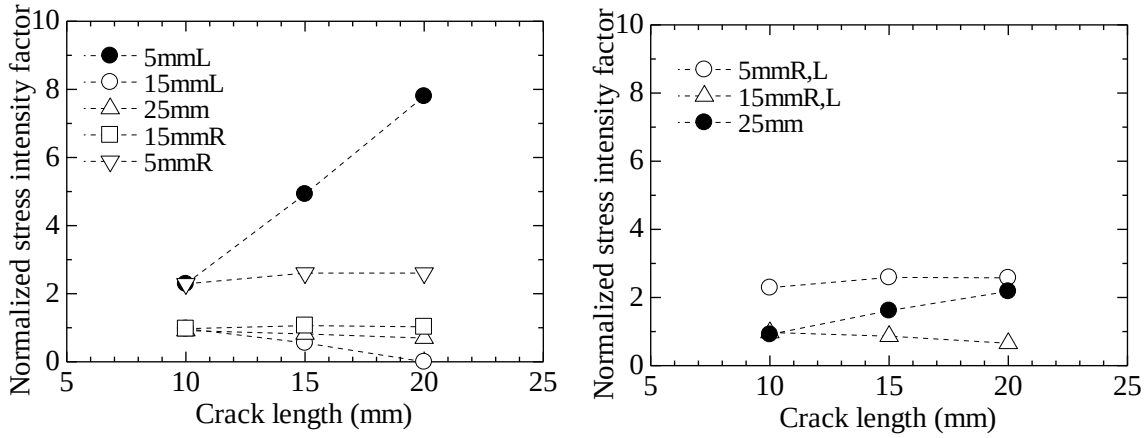


Fig. 8 Effect of crack location and length on stress intensity

裂の応力拡大係数は低下することがわかった。

3・4　既往の試験結果に関する考察

凍結融解試験では岩石の表面と連結しているき裂面に氷の膨張圧等に起因する内圧が繰返し作用する。したがって(2)式の Paris 則[4]にしたがいき裂が伸長する可能性が高い。



(a) Growth of the edge crack　　(b) Growth of the center crack

Fig.9 Effect of crack growth on stress intensity

$$\frac{da}{dN} = D\Delta K_I^m \tag{2}$$

ここで，a はき裂の長さ，N は負荷の繰返し数，D, m は材料定数，ΔK_I は応力拡大係数の変動幅である。今，融解により内圧が 0 になると考えると ΔK_I は応力拡大係数 K_I と一致し，K_I が大きいき裂ほど伸長が大きいことを意味する。このことを前提条件として上述した解析結果をもとに既往の試験結果について考察する。

寸法が 50mm×50mm×50mm の泥質片岩を対象とした凍結融解試験[1]では以下の特徴が認められた。（1）き裂の伸長は特定のへき開面に沿って進行し，そのき裂が供試体を貫通すると新たな特定のき裂が伸長する。（2）供試体の側面に近いへき開面に沿ってき裂が伸長する。3・2 の解析から，き裂の長さが同じ場合には，モデルの側面に近いき裂ほど応力拡大係数は大きく，この特徴は解析を実施したすべてのき裂長さにおいて認められ，また，き裂の密度にも依存しなかった。このことより，直方体の岩石供試体では側面に近いへき開面ほど応力拡大係数が大きくなり，上記（2）のように供試体の側面に近いへき開面に沿ってき裂が伸長したものと解釈できる。また，3・3 の解析から，き裂の位置によらずある特定のき裂が伸長すると，もっぱらそのき裂の応力拡大係数のみが増加し，その他のき裂の応力拡大係数は増加しなかった。疲労き裂の伸長速度は(1)式からわかるように応力拡大係数 ΔK_I に加え，材料定数の D と m にも関係する。岩石の不均質性を踏まえると D と m の値はき裂により異なる場合があると考えられ，ΔK_I が小さくても D と m が大きなき裂の伸長速度は大きくなる。したがって，ΔK_I の小さな中央部にあるき裂が伸長する可能性があるが，その場合にも，もっぱらそのき裂の応力拡大係数のみが増加するため，上記（1）のようにある特定のへき開面に沿ってき裂が伸長したものと解釈できる。

4.　おわりに

平行な片側き裂を複数有する 2 次元弾性体のき裂面に内圧が作用するときの応力拡大係数を有限要素法により評価し，き裂の応力拡大係数に与えるき裂の位置，密度，長さの影響について検討したうえ，片理面の発達した泥質片岩のき裂進展挙動に関して考察した結果，以下のことが明らかとなった。

（1）応力拡大係数に影響を与えるのはき裂の位置であり，長さと内面に作用する力が等しい場合には側面に近いき裂ほど応力拡大係数は大きくなること，この影響はき裂が長いほど大きいこと，き裂の密度の影響は小さい。

（2）ある特定のき裂が伸長するときには，もっぱらそのき裂の応力拡大係数が増加し，その近傍のき裂の応力拡大係数は低下する。

（3）既往の研究で観察された泥質片岩におけるき裂の伸長挙動は，上記の応力拡大係数の特徴から解釈できる。

引用文献

1) 児玉淳一他 (2011), J.MMIJ, vol.127, pp.117-126.
2) 児玉淳一他 (2014), 材料, vol.63, pp.219-226.
3) 白鳥正樹他 (1988), 数値破壊力学, 実教出版, pp.62-67.
4) 和田千春他 (1986), J.MMIJ, vol.102, pp.531-536.