

人工軟岩のき裂進展に及ぼす粘土鉱物混合率の影響

鳥取大学	学生会員	○吉田 智彦
鳥取大学	正会員	河野 勝宣
鳥取大学	フェロー会員	西村 強

1. 緒 言

新生代に形成された堆積岩類や様々な変質作用を受けた諸岩類は粘土鉱物を含むことが多く、これらの岩類は岩石自体の強度が低いだけでなく、含有粘土鉱物の影響による岩石組織の物理的または化学的な劣化度合いが大きい。また、含有粘土鉱物は地すべりなどの斜面災害、建設工事における盤ぶくれや崩壊等の要因の一つとして挙げられる。そのため、粘土鉱物を含む地盤材料や岩質材料の物性について検討した研究は各分野において数多くなされ、粘土鉱物が岩石の強度低下に何らかの影響を及ぼすことが明らかになっている。

日本列島の地質は、熱水変質帯や破碎帯、風化帯が広範囲に分布しており、多種多様な粘土鉱物が存在している。したがって、地盤材料や岩質材料の物性を評価するうえで粘土鉱物の種類や含有率に注目することは非常に重要である。前述したように、粘土鉱物を含む岩質材料の物性について検討した例はあるが、強度低下に影響を及ぼす粘土鉱物の種類について研究した例は非常に少ないため、河野ほか¹⁾は、粘土鉱物を混合させた石膏・粘土鉱物混合供試体を作成して一軸圧縮試験を実施した。その結果、乾燥状態における供試体の一軸圧縮強度は粘土鉱物の種類によって大きな差がみられ、この差は含有粘土鉱物の層間に働く化学結合の種類、すなわち結合力の大小関係を反映するような結果であったことを報告した。

本研究では粘土鉱物と石膏を混合した切欠きを有する人工軟岩供試体を作成し、三点曲げ試験を実施した。き裂の変形は一般に図-1^{2),3)}のように表されるが、本研究ではモードIを研究対象とした。本報告では、粘土鉱物の種類・混合率と曲げ強度、応力拡大係数との関係について考察した結果を報告する。

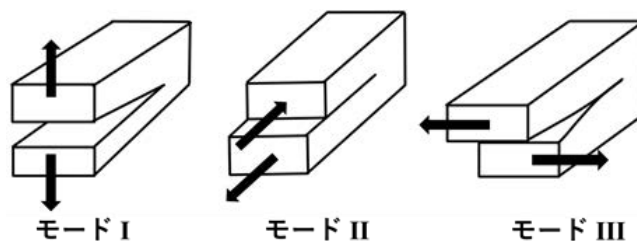
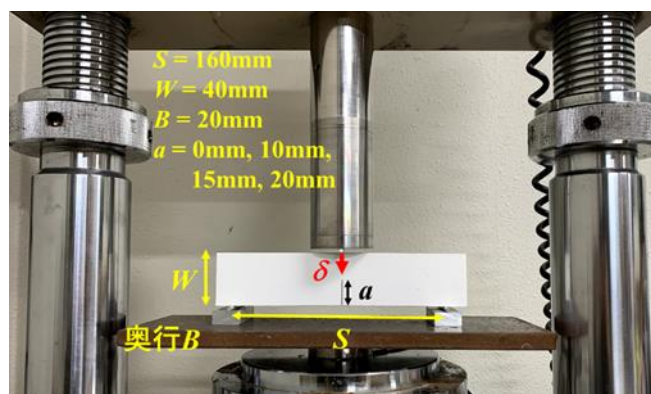
図-1 き裂先端の三つの独立な変形様式^{2),3)}

図-2 三点曲げ試験

2. 供試体の作成および実験方法

石膏と粉末試料(粘土鉱物、石英)を混合した人工軟岩供試体(図-2)を作成した。供試体の配合割合、作成手順は既往の研究¹⁾と同様であるが、粉末を攪拌し型枠に流し込む際、切欠き作成用のナイフを挿入した。使用した粘土鉱物の種類はスメクタイトとカオリナイト、粘土鉱物混合率は0%、10%、20%、切欠き長さ a (図-2)は0mm、10mm、15mm、20mmである。供試体は C_c と a を組み合わせた全20種、各種3本ずつ、計60本作製した。三点曲げ試験は、恒温室($22 \pm 1^\circ\text{C}$)で行い、供試体の含水状態は乾燥状態(供試体を 70° で24時間乾燥させた)とし、載荷点を $\delta=0.01\text{mm/min}$ の速度で降下させて、必要となる力を荷重計で計測した。

キーワード 粘土鉱物, 人工軟岩, モードI破壊, 曲げ強度, 応力拡大係数

連絡先 〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4丁目101 鳥取大学大学院 TEL: 0857-31-5291

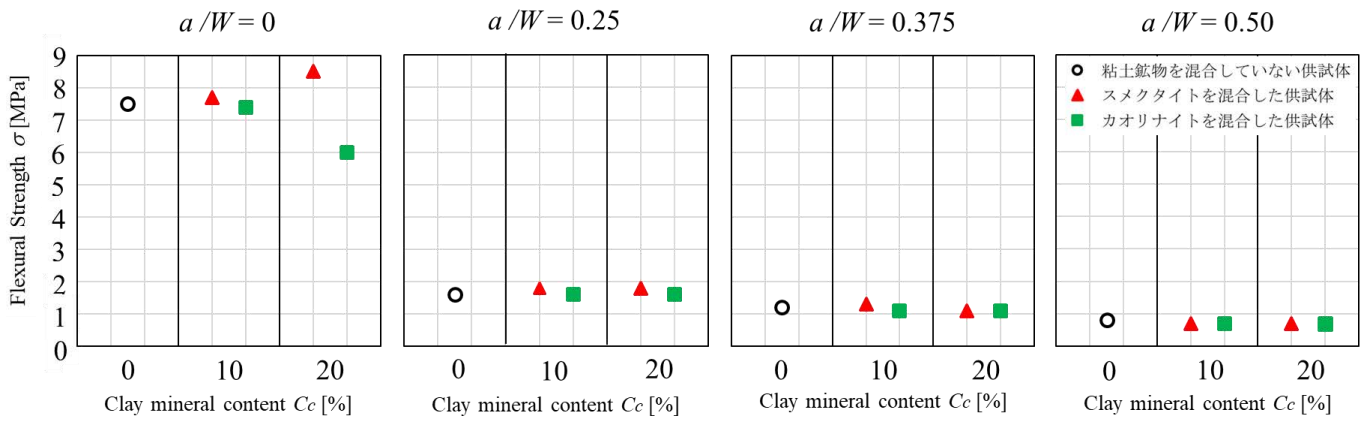


図-3 粘土鉱物混合率 C_c と曲げ強度の関係

3. 三点曲げ試験結果

3.1 粘土鉱物混合率と曲げ強度の関係

図-2の供試体中央部(切欠きの延長線上)における曲げ強度 σ は、三点曲げ試験で得られた破壊荷重 P をもとに(1)式で算出される。

$$\sigma = \frac{3PS}{2BW^2} \quad (1)$$

図-3は a/W ごとの、 C_c と σ の関係を示している。同中にはそれぞれ3本の供試体の試験結果の平均値を示した。 $a/W=0$ のときでは、スメクタイトを混合した供試体の σ は $C_c=0\%$ のときの σ と比較して、 $C_c=10\%$ のときは3%増加し、 $C_c=20\%$ のときは13%増加している。一方で、カオリナイトを混合した供試体の σ は $C_c=0\%$ のときの σ と比較して、 $C_c=10\%$ のときは1%低下し、 $C_c=20\%$ のときは20%低下している。したがって、 $a/W=0$ のときの σ は粘土鉱物の種類や C_c によって異なることがいえる。また、スメクタイトを混合した供試体およびカオリナイトを混合した供試体において、 C_c の増加に伴う σ の増減は、既往の研究¹⁾における一軸圧縮強度と同様の傾向であった。

次に、図-3の切欠きを有する場合に着目する。 $C_c=10\%$ および $C_c=20\%$ での σ を粘土鉱物の種類ごとに比較すると、 a/W が同じであれば C_c によらず σ は同程度の値である。また、 a/W ごとに σ を比較すると、粘土鉱物の種類と C_c に関係なく a/W が大きくなるにつれて σ が同程度の値をとるようになり、その値は低下している。さらに、切欠きを有する供試体の $C_c=10\%$ と $C_c=20\%$ での σ の差は $a/W=0$ のときと比較して非常に小さいものである。これらのことから、切欠きを有する供試体の σ は、粘土鉱物の種類や C_c よりも切欠き長さの影響を受けていることがわかる。

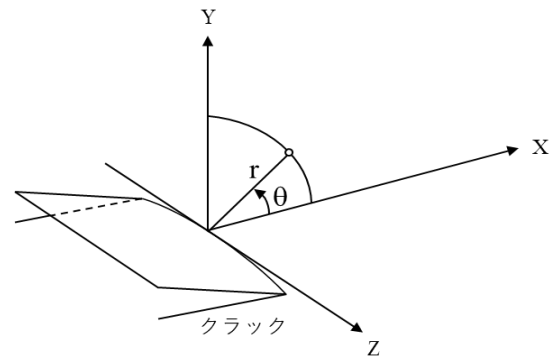


図-4 3次元任意形状き裂の前縁にとった座標系^{4),5)}

3.2 粘土鉱物混合率と応力拡大係数の関係

図-4のようにき裂進展方向をX軸、き裂面に垂直にY軸、き裂前縁の接線をZ軸とすると、き裂先端近傍の応力場において、き裂先端を中心とした極座標系(r, θ)で表すとモードIの応力成分は(2)式で表される^{4),5)}。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \begin{Bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで K_I はモードIでの応力拡大係数で、以下 K の添え字Iは省略する。 $\theta=0$ とすると(3)式が得られる。

$$K = \sqrt{2\pi r} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

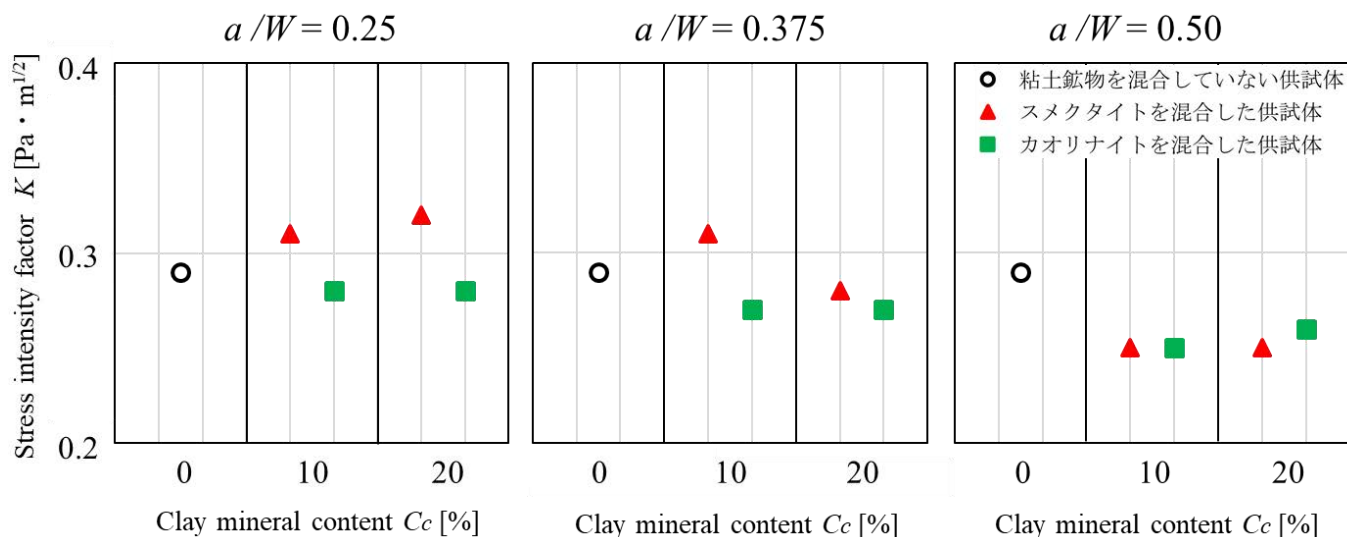


図-5 粘土鉱物混合率 C_c と応力拡大係数の関係

遠方の σ_y が $\sigma_y = \sigma_0$ であるとし、き裂を含む弾性体の形状や境界条件を考慮した係数 F を導入して得られる(4)式を用いて応力拡大係数の算出を行う。

$$K = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \cdot F \quad (4)$$

ここで σ_0 は公称曲げ応力で、(5)式で求められる。

$$\sigma_0 = \frac{3PS}{2W^2} \quad (5)$$

また、本試験では $S/W=4$ (供試体支点間距離 S を供試体高さ W で除した値) より、 F は(6)式より算出した。なお、 $\xi = a/W$ である^{6),7)}。

$$F = 1.090 - 1.735\xi + 8.20\xi^2 - 14.18\xi^3 + 14.57\xi^4 \quad (6)$$

(2)式において、 K は σ_0 の値によって決まることから、図-5の各点は図-3と同様の傾向を示すことがわかる。ここで、図-6は三点曲げ試験時に撮影したき裂の様子(図中の矢印は亀裂の先端部を示す)であるが、 a/W が同じでもスメクタイトを20%混合した場合、き裂進展速度が速くなったことがわかる。これはカオリナイトにおいても同様であった。したがって、粘土鉱物の種類と C_c は、き裂進展速度に影響を及ぼす要因の一つになると考えられる。

4. 結 言

粘土鉱物の種類と混合率は、 $a/W=0$ の供試体における曲げ強度、さらに、切欠きを有する供試体のき裂進展速度に影響を及ぼすことがわかった。特に、 $a/W=0$ の供試体における曲げ強度は既往の研究¹⁾と同様の傾向を示した。また、切欠き長さは、切欠きを有する供試体における曲げ強度および応力拡大係数に、

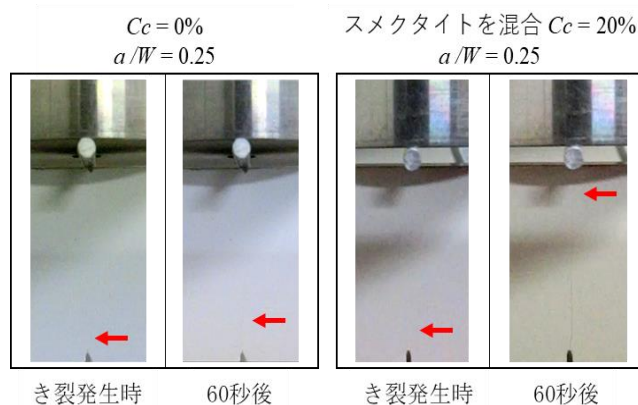


図-6 三点曲げ試験時に撮影したき裂の様子

粘土鉱物の種類や混合率よりも影響を与え、 a/W の増加に伴って、曲げ強度および応力拡大係数が低下することがわかった。

参考文献

- 1) 河野勝宣・竹原裕太・西村 強：粘土鉱物の種類の違いに着目した岩質材料の物性に関する一考察，材料，Vol.67，No.3，pp.324-329，2018。
- 2) 土質工学会：岩の調査と試験 - 土質工学会編 - ，土質工学会，pp.465-470，1989。
- 3) 谷村康行：破壊工学 - 基礎のきそ - ，日刊工業新聞社，pp.77-93，2009。
- 4) 村上敬宜：弾性力学，養賢堂，pp.59-62，2014。
- 5) 小林英男：破壊力学，共立出版，1993
- 6) 矢川元基：破壊力学 - 理論・解析から工学的応用まで - ，培風館，p.33，1988。
- 7) 岡村弘之：破壊力学と材料強度講座 1 - 線形破壊力学入門 - ，培風館，p.218，1976。