

岩石亀裂の粗さの定量化と強度・変形特性に関する研究

若林成樹
(技術研究所)
木下直人
(技術研究所)
石塚与志雄
(技術研究所)
福重郁鋺
(技術研究所)

§ 1. はじめに

地下揚水発電所、石油地下備蓄施設や圧縮空気貯蔵施設などの大規模な岩盤空洞は硬質岩盤中に掘削される場合が多い。硬質岩盤中には破碎帯や断層等の連続した大規模な亀裂から節理や層理などの中規模の亀裂まで多数含まれ、岩盤の強度や変形特性は岩石基質の物性より、むしろ亀裂物性や分布特性によって左右される場合が多い。そのため、空洞の安定性評価のために亀裂を考慮した様々な解析手法の適用が試みられている^{1)~3)}。これらの解析では亀裂のせん断強度やせん断剛性・垂直剛性などの物性が非常に重要な入力定数となる。

亀裂の物性は粗さ、壁面の強度・風化度、間隙幅や充填物の有無・厚さ・物性などに影響を受ける。大規模亀裂は充填物の特性によってその物性が支配されるが、中規模亀裂では粗さ、壁面の強度・風化度が亀裂の物性に大きく影響する。

本報告では中規模亀裂を対象にして粗さの定量化と室内試験によって物性を把握した結果を報告する。現状でも粗さの定量的な指標がいくつか提案されている。しかし、主に目視観察で判定するため、客観性に欠ける場合がある。そこで客観的かつ定量的に評価する方法としてフラクタル次元を用いることを提案し、現状で最も利用されている粗さ指標の一つである JRC 値との相関を求めた。次に3種類の岩石ブロックを割裂して作成した人工亀裂および3ヶ所で採取した天然亀裂の粗さの評価を行い、亀裂の強度・変形特性を把握した結果を報告する。

§ 2. 亀裂粗さの定量化

2.1 粗さの定量化パラメータ

亀裂の粗さを定量的に評価する指標はいくつか提

案されている。ISRM 指針⁴⁾では図-1のように目視観察で粗さをⅠ~Ⅸの段階に分類したり、図-2のように Barton and Bandis らの提案している JRC 値と呼ばれる 0~20 までの数値で表す方法が推奨されている。粗さは亀裂のせん断強度 τ と密接な関係があり、粗くなるほどせん断強度は増加する。

粗さⅠ~Ⅸに対してせん断強度は以下の順になる。

$$\begin{aligned} & \text{Ⅰ} > \text{Ⅱ} > \text{Ⅲ}, \text{Ⅳ} > \text{Ⅴ} > \text{Ⅵ}, \text{Ⅶ} > \text{Ⅷ} > \text{Ⅸ} \\ & \text{Ⅰ} > \text{Ⅳ} > \text{Ⅶ}, \text{Ⅱ} > \text{Ⅴ} > \text{Ⅵ}, \text{Ⅲ} > \text{Ⅸ}, \text{Ⅵ} > \text{Ⅸ} \end{aligned} \quad (1)$$

JRC 値に対しては以下で表される。

$$\tau = \sigma_n \tan [JRC \log_{10}(JCS / \sigma_n) + \phi_r] \quad (2)$$

ここで、JCS：亀裂面の軸圧縮強度

ϕ_r ：残留摩擦角

Barton and Bandis らはせん断強度だけでなく、せん断剛性・垂直剛性などの推定式も提案していることもあり、粗さ指標の中で JRC 値が現状で最も利用されている。しかし、目視観察による JRC 値の判定は非常に簡便である反面、熟練していないと曖昧になりやすいという欠点がある。図-2を見ても JRC 値が 6~8 以上になると判別が難しい。

そこで JRC 値と相関性の良い客観的かつ定量的な指標として吉中ら⁵⁾は亀裂の勾配の自乗平均、正勾配の平均、最大高低差をあげている。また、亀裂の表面形状は様々な周期の波が合成されたものとの見地から谷本ら⁶⁾はパワースペクトル解析を行い、スペクトルの強さと傾きやパワースペクトルモーメントを粗さの指標とすることを提案している。これらの指標は算定する際の間隔によって値が変動したり、物理的な解釈が難しい等の課題が残る。

そこで本報告では Mandelbrot⁷⁾が提案したフラクタル次元: Df を用いて亀裂粗さを客観的に定量化することを提案する。フラクタル次元は自己相似図形の複雑さを表す指標であり、2次元図形であれば Df は 1.0~2.0 の範囲となる。Df は形状が複雑になるほど大きな値を示し、粗さの無い直線であれば

1.0 となり、海岸線で概ね 1.0~1.3, サンアンドレアス断層で 1.1~1.5 となると報告されている^{9,10)}。

2.2 フラクタル次元の算定方法¹¹⁾

フラクタル次元: Df を求めるにはコンパス法, スベクトル法, 物差し法などいくつかあるが, ここではコンパス法を用いた。まず, デジタイザーなどで粗さ形状を等間隔で測定する。粗さの断面図の一端から半径 r の半円で区切ってゆき, もう一端に達するまでの半円の個数 N(r) をカウントする。半径 r を変化させて N(r) との関係を探るとフラクタルな図形であれば以下の関係が成立する。

$$N(r) \propto r^{-Df} \quad (3)$$

したがって半径 r と N(r) との関係を探るに両対数軸にプロットした傾きの絶対値が Df になる。粗さの強調と, カウントできなかつた残長 ϵr の補正を行うために, 次式から Df を算定した。

$$r N(r) + \epsilon r \propto r^{1-Df} \quad (4)$$

左辺は亀裂の粗さ形状を長さ r の折れ線で近似した場合の総延長になる。半径 r を変化させて総延長を求め, 両対数軸にプロットしたときの傾きの絶対値 +1 が Df となる。長さの異なる亀裂でも同様の処理ができるように亀裂長さで基準化した粗さ形状データを用いて算定した。

2.3 フラクタル次元と JRC 値

図-2 に示した JRC 値の断面図例を長さ方向にデジタイザーで 300 点づつ読み取り, フラクタル次元

元 Df を算定した。例として図-3 に JRC 値が 8~10 と 18~20 の断面図に対する式(4)の関係を示す。

半径 r と総延長が直線関係を示す $\log_{10}(r)$ が -1.0 ~ -2.0 の勾配から Df を算定した。間隔を短くして測定点数を増やせば直線関係を示す範囲は広がるが, 図に示す範囲で十分に Df を算定することができる。このことは長さ方向に 200~300 点程度測定すれば粗さを十分に表現できることを示している。

算定の結果, JRC 値が 8~10 では $Df=1.0051$, JRC 値が 18~20 では $Df=1.0179$ となった。同様に他の断面図例から JRC 値と Df の関係を探った結果を図-4 に示す。これによれば JRC 値が大きくなる(亀裂が粗くなる)につれて Df も大きくなり, 両者の相関が高いことが分かる。

粗さの無い直線であれば Df は 1.0, JRC 値は 0 であること, 粗くなるにつれて Df, JRC 値とも増加することを考慮して次式の単調増加式で JRC 値と Df の関係を表現することを提案する。

$$JRC = \sqrt{(Df-1)/4.413 \times 10^{-7}} \quad (5)$$

上式を図中に実線で示す。また, Lee ら¹²⁾も Df と JRC 値との相関を探り, 以下の 2 次式で表現している。この関係も図中に破線で示した。

$$JRC = -0.878 + 37.7844(Df-1)/0.015 - 16.930[(Df-1)/0.015]^2 \quad (6)$$

両者とも比較的類似しているが, Lee らの近似式では JRC 値が 20 を越える範囲では適用できない。

このように亀裂粗さを 200~300 点計測(長さに対して 0.5~0.33% 程度のピッチ)すればフラクタル

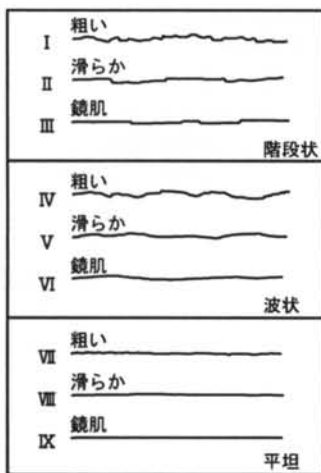


図-1 典型的な粗さ形状の分類

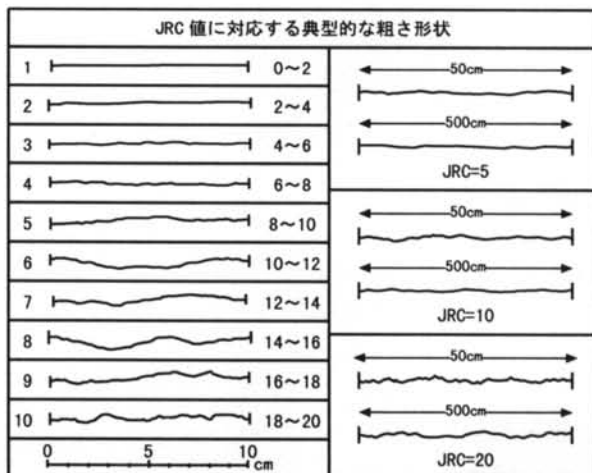


図-2 粗さ形状とそれに対応する JRC 値の範囲

次元で粗さを定量的に表現することが可能であることが得られた。

§ 3. 岩石亀裂の粗さの評価

岩石亀裂の粗さが実際にはどの程度なのかを把握するために人工的に作成した亀裂と現場で採取した天然の亀裂の粗さを測定した。

人工亀裂は岩石ブロックにスリットを入れ、写真-1に示すように割裂して作成した。用いた岩石は福島県産の三城目安山岩、茨城県産の稲田花崗岩と愛知県産の足助花崗岩の3種類である。亀裂長さは450~220mmである。天然亀裂は写真-2に示すように亀裂面が中央に位置するように方向を調整して

直径150mmのボーリングで採取した。採取したのは足助花崗岩(人工亀裂のブロックを採取したのと同じ採石場)、片麻岩(岐阜県K鉱山)と花崗閃緑岩(岩手県K鉱山)の3種類である。亀裂長さは150~220mm程度である。

粗さは上下方向のスライダーに変位計を取り付けた装置で2~5測線に沿って1mmピッチで測定した。図-5に測定例と目視判定、およびフラクタル次元から算定したJRC値を示す。人工亀裂は鉱物粒子に沿って割裂されるため細かな粗い凹凸面であるが、天然亀裂は波状の滑らかな亀裂となっている。

目視によるJRC値は人工亀裂で6~8から16~18、天然亀裂では2~4から10~12と広範囲にわたると判定された。一方、フラクタル次元から算出したJRC値は人工亀裂で11.7~13.3、天然亀裂で5.4~

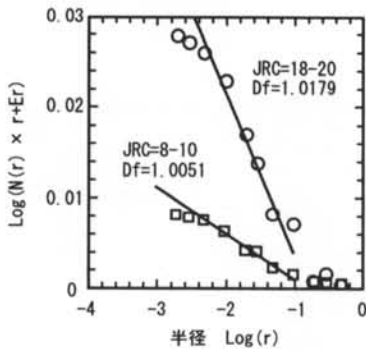


図-3 フラクタル次元の算定例

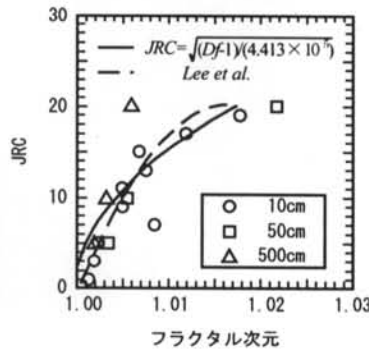


図-4 フラクタル次元とJRC値

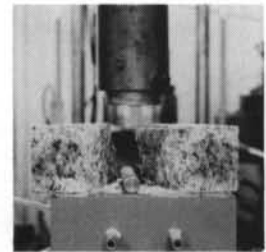


写真-1 人工亀裂の作成方法

| 種類 | 岩石 | 番号 | 粗さ | 目視 JRC | JRC 式(5) |
|------|--------|----------|----|--------|----------|
| 人工亀裂 | 三城目安山岩 | ASA05-A | | 6~8 | 12.8 |
| | | ASA12-A | | 16~18 | 11.9 |
| | 稲田花崗岩 | A1G07-A | | 8~10 | 13.3 |
| | | A1G09-A | | 6~8 | 11.8 |
| | 足助花崗岩 | AAG257-A | | 6~8 | 13.5 |
| | | AAG236-A | | 6~8 | 12.0 |
| | | AAG249-A | | 12~14 | 11.7 |
| 天然亀裂 | 足助花崗岩 | NAG-C-A | | 10~12 | 8.9 |
| | | NAG-E-A | | 12~14 | 10.2 |
| | 片麻岩 | NKN-A1-A | | 4~6 | 8.2 |
| | | NKN-B1-A | | 2~4 | 5.4 |
| | 花崗閃緑岩 | NKD-A1-A | | 4~6 | 8.5 |
| | | NKD-B9-A | | 6~8 | 6.7 |

図-5 亀裂の粗さ形状と目視によるJRC値

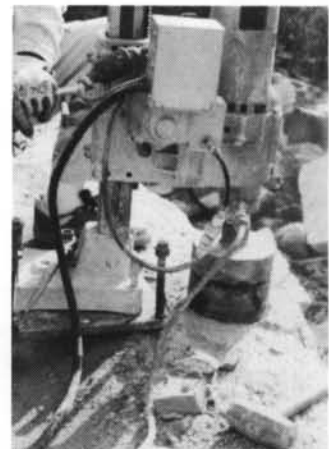


写真-2 天然亀裂の採取方法

10.2 と比較的狭い範囲で粗さを判定できている。

また、表-1 に各測線の粗さ形状から算定したフラクタル次元と提案式から求めた JRC 値を示した。JRC 値の平均値は、人工亀裂の三城目安山岩で 12.8 ~ 14.5、稲田花崗岩で 12.0 ~ 14.3、足助花崗岩で 11.7 ~ 14.0 の範囲であり、すべてが比較的粗い亀裂であると判定される。一方、天然亀裂の JRC 値は足助花崗岩で 9.3 ~ 12.8、緑色片麻岩で 5.6 ~ 8.7、花崗閃緑岩で 7.2 ~ 10.3 となり、すべてが中程度の粗さの亀裂と判定された。

目視観察では曖昧さや主観のために粗さが大きく

ばらつくが、フラクタル次元を用いるとばらつきが減少し、精度の良い判定が可能となる。

§ 4. 岩石亀裂の強度・変形特性

4.1 試験装置と試験方法

亀裂の強度や変形挙動は亀裂粗さだけではなく亀裂面の強度や垂直応力によっても変化する。亀裂の基本的な強度・変形特性を把握するために表-1 の人工亀裂と天然亀裂を対象に以下の実験を行った。

| 種類 | 岩石 | 番号 | 測線ごとのフラクタル次元 | | | | | JRC 値 | せん断試験 | | 垂直載荷試験 | |
|-------|--------|--------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|-----------|-------------|
| | | | A | B | C | D | E | | 平均 | 垂直応力 | 備考 | 垂直応力 |
| 人工亀裂 | 三城目安山岩 | ASA03 | 1.0075 | 1.0090 | 1.0079 | 1.0092 | 1.0080 | 1.0083 | 13.7 | 0.2MPa | せん断の変位計なし | - |
| | | ASA10 | 1.0147 | 1.0088 | 1.0079 | 1.0081 | 1.0072 | 1.0093 | 14.5 | 0.2MPa | | - |
| | | ASA04 | 1.0075 | 1.0090 | 1.0088 | 1.0090 | 1.0097 | 1.0088 | 14.1 | 0.8MPa | | - |
| | | ASA11 | 1.0084 | 1.0089 | 1.0099 | 1.0098 | 1.0096 | 1.0093 | 14.5 | 0.8MPa | | - |
| | | ASA05 | 1.0072 | 1.0073 | 1.0079 | 1.0064 | 1.0071 | 1.0072 | 12.8 | 3.7MPa | | - |
| | | ASA12 | 1.0063 | 1.0075 | 1.0093 | 1.0069 | 1.0096 | 1.0079 | 13.4 | 3.7MPa | | - |
| | | ASA07 | 1.0081 | 1.0089 | 1.0103 | 1.0095 | 1.0097 | 1.0093 | 14.5 | 7.3MPa | | - |
| | | ASA09 | 1.0063 | 1.0092 | 1.0077 | 1.0087 | 1.0082 | 1.0080 | 13.5 | 7.3MPa | | - |
| | | 稲田花崗岩 | AIG03 | 1.0087 | 1.0069 | 1.0099 | 1.0092 | 1.0077 | 1.0085 | 13.9 | | 0.4MPa |
| AIG05 | 1.0094 | 1.0072 | 1.0079 | 1.0070 | 1.0063 | 1.0076 | 13.1 | 0.4MPa | - | | | |
| AIG04 | 1.0086 | 1.0085 | 1.0079 | 1.0071 | 1.0097 | 1.0084 | 13.8 | 1.6MPa | - | | | |
| AIG06 | 1.0082 | 1.0077 | 1.0087 | 1.0083 | 1.0123 | 1.0090 | 14.3 | 1.6MPa | - | | | |
| AIG07 | 1.0078 | 1.0075 | 1.0082 | 1.0078 | 1.0087 | 1.0080 | 13.5 | 4.7MPa | - | | | |
| AIG09 | 1.0061 | 1.0061 | 1.0064 | 1.0068 | 1.0064 | 1.0064 | 12.0 | 4.7MPa | - | | | |
| 天然亀裂 | 足助花崗岩 | AAG274 | 1.0071 | 1.0077 | - | - | - | 1.0074 | 12.9 | 2.9MPa | LVDT | - |
| | | AAG273 | 1.0080 | 1.0070 | - | - | - | 1.0075 | 13.0 | 2.9MPa | | - |
| | | AAG257 | 1.0080 | 1.0066 | - | - | - | 1.0071 | 12.7 | 2.9MPa | | - |
| | | AAG228 | 1.0073 | 1.0074 | - | - | - | 1.0074 | 12.9 | 2.9MPa | | - |
| | | AAG206 | 1.0078 | 1.0081 | - | - | - | 1.0080 | 13.5 | 2.9MPa | | - |
| | | AAG258 | 1.0071 | 1.0069 | - | - | - | 1.0070 | 12.6 | 5.9MPa | | - |
| | | AAG236 | 1.0064 | 1.0078 | - | - | - | 1.0071 | 12.7 | 5.9MPa | | - |
| | | AAG234 | 1.0064 | 1.0079 | - | - | - | 1.0073 | 12.9 | 5.9MPa | | - |
| | | AAG279 | 1.0063 | 1.0076 | - | - | - | 1.0070 | 12.6 | 11.9MPa | | - |
| | | AAG249 | 1.0060 | 1.0060 | - | - | - | 1.0060 | 11.7 | 11.9MPa | | - |
| | | AAG247 | 1.0061 | 1.0075 | - | - | - | 1.0068 | 12.4 | 11.9MPa | | - |
| | | AAG094 | 1.0096 | 1.0078 | - | - | - | 1.0087 | 14.0 | - | | 0 ~ 11.9MPa |
| | | AAG058 | 1.0085 | 1.0060 | - | - | - | 1.0073 | 12.9 | - | | 0 ~ 11.9MPa |
| 天然亀裂 | 足助花崗岩 | NAG-C | 1.0035 | 1.0061 | - | - | - | 1.0048 | 10.4 | 2.9MPa | LVDT | - |
| | | NAG-E | 1.0046 | 1.0029 | - | - | - | 1.0038 | 9.3 | 2.9MPa | | - |
| | | NAG-B | 1.0045 | 1.0053 | - | - | - | 1.0049 | 10.5 | 5.9MPa | | - |
| | | NAG-F | - | - | - | - | - | - | - | 5.9MPa | | - |
| | | NAG-A | 1.0070 | 1.0075 | - | - | - | 1.0073 | 12.8 | - | | 0 ~ 11.9MPa |
| | | NAG-D | 1.0035 | 1.0073 | - | - | - | 1.0054 | 11.1 | - | | 0 ~ 11.9MPa |
| 天然亀裂 | 片麻岩 | NKN-A1 | 1.0030 | 1.0035 | - | - | - | 1.0033 | 8.7 | 2.9MPa | LVDT | - |
| | | NKN-B1 | 1.0013 | 1.0014 | - | - | - | 1.0014 | 5.6 | 2.9MPa | | - |
| | | NKN-C1 | 1.0020 | 1.0014 | - | - | - | 1.0017 | 6.2 | - | | 0 ~ 11.9MPa |
| | | NKN-D | 1.0041 | 1.0020 | - | - | - | 1.0031 | 8.4 | - | | - |
| 天然亀裂 | 花崗閃緑岩 | NKD-A1 | 1.0032 | 1.0061 | - | - | - | 1.0047 | 10.3 | 2.9MPa | LVDT | - |
| | | NKD-B9 | 1.0020 | 1.0025 | - | - | - | 1.0023 | 7.2 | 2.9MPa | | 0 ~ 11.9MPa |
| | | NKD-B7 | 1.0034 | 1.0037 | - | - | - | 1.0036 | 9.3 | - | | 0 ~ 11.9MPa |
| | | NKD-B8 | 1.0024 | 1.0021 | - | - | - | 1.0023 | 7.2 | - | | - |
| | | NKD-A | 1.0030 | 1.0061 | - | - | - | 1.0046 | 10.2 | - | | - |

表-1 人工亀裂のフラクタル次元 Df と JRC 値、および室内試験条件

亀裂のせん断強度・せん断変形挙動を求めるために写真-3に示す丸東製作所社製のせん断・垂直方向とも100tonの载荷能力のある油圧サーボ式大型せん断試験装置を用いた。せん断変位は亀裂をまたぐように差動トランス型変位計(LVDT, 測定範囲±1.2mm)を表裏の2ヶ所に取り付けて計測した。所定の垂直応力を付加し、一定速度でせん断し、せん断変位～せん断応力関係を求めた。

また、亀裂の垂直変形挙動を把握するための垂直载荷試験は写真-4に示すようなMTS社製の载荷能力450tonの油圧サーボ式载荷装置を用いた。亀裂の垂直変位は亀裂をまたぐようにLVDTを4ヶ所に取り付けて計測した。载荷と除荷を10回繰り返し、垂直変位～垂直応力関係を求めた。

試験条件は表-1にまとめて示しておいた。

4.2 亀裂のせん断強度および変形特性

足助花崗岩の人工亀裂、および3種類の天然亀裂のせん断変位～せん断応力の関係を図-6に示す。人工亀裂は弾性的に0.05～0.1mmの変位でせん断強度まで達し、その後は急激な破壊を生じた。垂直応力が大きくなるにつれてせん断強度とそれに達するまでのせん断変位は増加する傾向が見られる。一方、天然亀裂は顕著な非線形挙動を示し、せん断強度に達するまでの変位は0.4～0.6mm前後と人工亀裂に比べて5～10倍程度の変形となっている。垂直応力が大きくなるにつれて強度およびそれに達するまでの変位が増加する傾向は同様である。

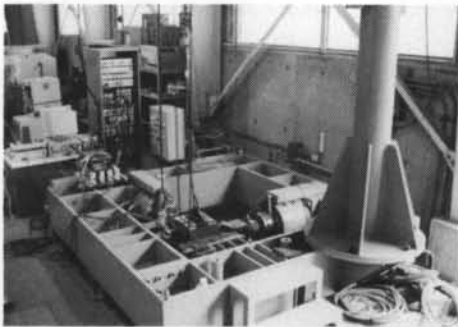


写真-3 せん断試験装置の外観



写真-4 MTS試験装置(450ton)の外観

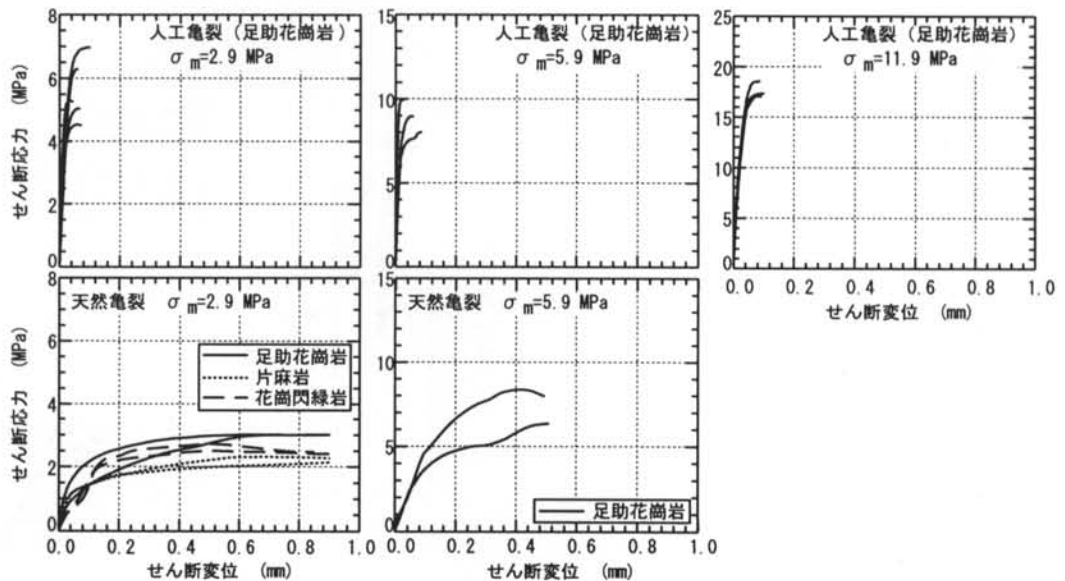


図-6 亀裂のせん断変形挙動

せん断強度と垂直応力の関係を図-7に示す。人工・天然亀裂ともせん断強度は若干の非線形性を示しながら垂直応力とともに増加する。また、人工亀裂の方が天然亀裂に比べて大きな強度を示すが、岩種による差は少ない結果となっている。

せん断剛性（せん断応力/せん断変位で図-6の初期勾配）と垂直応力の関係を図-8に示す。せん断剛性は大きくばらつくものの、垂直応力とともに増加する傾向が見られる。足助花崗岩の人工亀裂は200~1500MPa/mmと非常に大きな値を示すが、天然亀裂では10~50MPa/mmと小さくなっている。

亀裂のせん断剛性を調べた例として Bandis らの結果を図-9に示す¹³⁾。粗さに関する記述は無いが垂直応力が1~10MPa、亀裂長さが10⁻¹m程度であれば、せん断剛性は5×10⁰~2×10¹MPa/mmの範囲となっている。今回の試験結果の天然亀裂はほぼこの領域に入るが、人工亀裂はこれを大幅に上回る。

人工亀裂のせん断剛性が極めて大きいのは面が粗

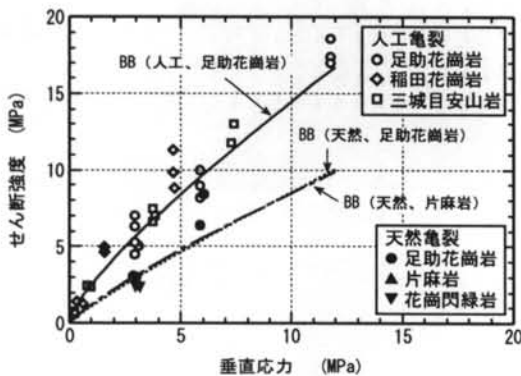


図-7 亀裂のせん断強度と垂直応力の関係

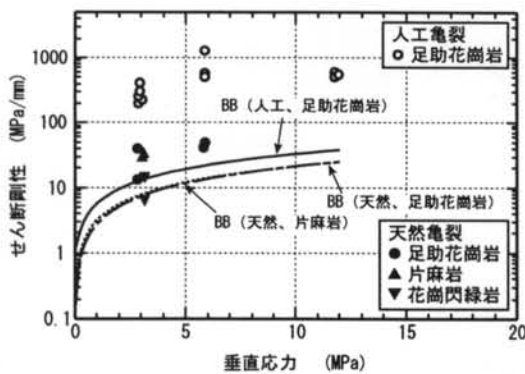


図-8 亀裂のせん断剛性と垂直応力の関係

く強度も大きいため、わずかな変位でかみ合い、大きなせん断抵抗を発生するためと考えられる。

4.3 亀裂の垂直変形特性

足助花崗岩の人工亀裂、および3種類の天然亀裂の垂直変形挙動(1,2,10載荷目)を図-10に示す。人工・天然亀裂とも載荷・除荷時とも低応力域での変形が大きく、応力が高くなるにつれ変形が減少する下に凸の顕著な非線形性を示す。特に1回目の載除荷時の変形と残留変位が大きい。残留変位は亀裂によって大きく異なり、人工亀裂では0.25mm前後、天然亀裂では0.05~0.38mmとなっている。しかし、2回目以降は変形および残留変位は急激に減少し、載除荷時の挙動はすべての亀裂で類似してくる。

図-11に割線垂直剛性(垂直応力/垂直変位で図-10の勾配)と繰返し回数との関係を示す。1回目は変形が大きいため、垂直剛性は小さくなっている。2回目以降の垂直剛性は繰返し回数とともに徐々に大きくなり、ある値に収束する傾向を示す。また、人工亀裂に比べ天然亀裂の垂直剛性の方が小さくなる傾向が見られる。

1回目の載除荷時に変形しやすく、ばらつくのは初期に亀裂が開口しており、開口幅が亀裂によって異なっているためである。そのため垂直剛性も小さくなる。いったん載荷すると亀裂が密着するために以後の変形は小さくなり、垂直剛性は大きくなると考えられる。

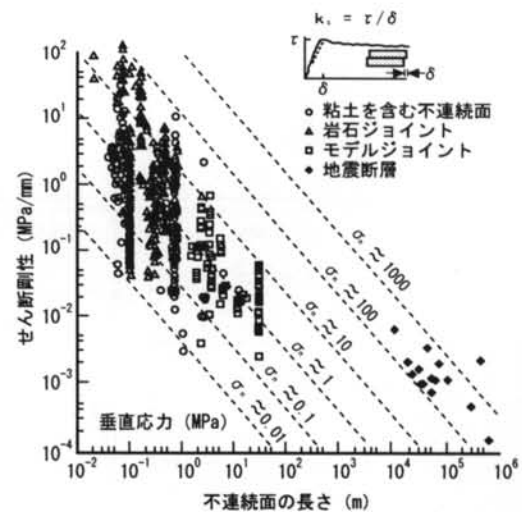
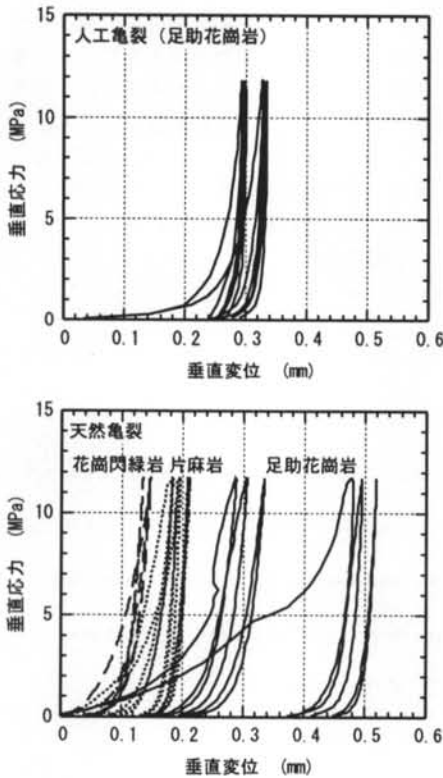


図-9 各種亀裂のせん断剛性 (Bandis ら¹³⁾)

4.4 BBモデルとの比較

Barton and Bandisらは様々な亀裂モデルや天然亀裂の試験結果に基づき、JRC値、亀裂面の一軸圧縮強度JCSと残留摩擦角 ϕ_r の3つのパラメータから式(2)のせん断強度の他にせん断剛性や垂直変形挙動を推定する経験式(BBモデル)を提案している^{13,15)}。JCSや ϕ_r は亀裂面および新鮮面におけるシュミットハンマーの反発度(それぞれ r と R)から推定できる。垂直変形挙動は上記パラメータに加え、載荷回数に応じた4つの変数を用いてモデル化されている。詳しくは参考文献を参照されたい。

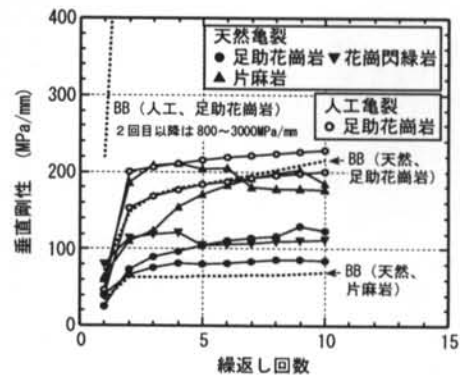


図一10 亀裂の垂直変形挙動

各亀裂に対するパラメータを表-2に示す。JRC値はフラクタル次元から算出された平均値を示した。人工亀裂面は細かな粗い凹凸のためシュミットハンマーが正常に反発しないこと、亀裂面は新鮮であることを考慮して反発度 r は岩石ブロック側面での反発度 R と同じとみなしてのJCSを推定した。推定されたJCSは岩石の一軸圧縮強度の2~3倍になっているが、今回はそのまま用いることにした。

人工亀裂のJRC値、JCSや ϕ_r はほぼ同程度なので例として足助花崗岩の、天然亀裂は上下限の例として足助花崗岩と片麻岩の場合のせん断強度、せん断剛性と垂直剛性を推定した結果を図-7, 8, 11に併記しておいた。人工亀裂に対してはせん断強度は実験結果と推定値は比較的一致するが、せん断剛性や垂直剛性は全く一致していない。天然亀裂に関してはせん断強度、せん断剛性、垂直剛性とも実験結果と推定値はほぼ一致している。

亀裂が粗く、面の強度が極めて大きい人工亀裂に対してはBBモデルの適用は難しい。しかし、今回の実験に用いた天然亀裂の粗さと面の強度であればフラクタル次元による粗さの定量化とシュミットハンマーの測定からBBモデルで亀裂の力学特性をある程度推定することが可能であると考えられる。



図一11 垂直剛性と繰返し回数の関係

| 亀裂 | 岩石 | JRC | ϕ_b | R | r | JCS(MPa) | ϕ_r |
|----|--------|------|----------|----|------|----------|----------|
| 人工 | 三城目安山岩 | 13.9 | 36° | 66 | (66) | 263 | 36° |
| | 桶田花崗岩 | 13.4 | 36° | 68 | (68) | 302 | 36° |
| | 足助花崗岩 | 12.8 | 36° | 69 | (69) | 324 | 36° |
| 天然 | 足助花崗岩 | 10.8 | 36° | 65 | 45 | 59 | 30° |
| | 片麻岩 | 7.2 | 35° | 68 | 58 | 149 | 32° |
| | 花崗閃緑岩 | 8.8 | 35° | 60 | 49 | 79 | 31° |

表一2 BBモデルの入力定数
 ϕ_b : 新鮮で平滑な面の摩擦角 R: 新鮮な面の反発度 r: 亀裂面の反発度

§ 5. まとめ

本報告では亀裂物性の評価に重要な亀裂粗さをフラクタル次元で客観的かつ定量的に評価する方法の提案を行い、現状で最も利用されている粗さ指標の一つである JRC 値との相関を求めた。次に 3 種類の人工亀裂と 3 種類の天然亀裂の粗さの評価を行い、亀裂の強度・変形特性を室内実験で把握した。得られた主な結果をまとめると以下ようになる。

- ① 亀裂粗さをフラクタル次元で客観的に定量化する手法を提案した。JRC 値はフラクタル次元から式(5)で推定される。目視観察に比べて精度の良い客観的な粗さの評価が可能となった。
- ② フラクタル次元から評価した JRC 値は三城目安山岩、稲田花崗岩、足助花崗岩の人工亀裂に対して各々 12.8~14.5, 12.0~14.3, 11.7~14.0 ですべてが比較的粗い亀裂と判定された。一方、足助花崗岩、片麻岩、花崗閃緑岩の天然亀裂に対しては各々 9.3~12.8, 5.6~8.7, 7.2~10.3 となり、すべてが中程度の粗さの亀裂と判定された。
- ③ 人工・天然亀裂ともせん断強度は若干の非線形性を示しながら垂直応力とともに増加する。また、人工亀裂の方が天然亀裂に比べて大きな強度を示す。同様にせん断剛性も垂直応力とともに増加し、人工亀裂の方が天然亀裂より大きな剛性を示す。人工亀裂の物性が大きいのは天然亀裂に比べて面の強度も大きく、亀裂面が粗いためである。

④ 亀裂の垂直変形挙動は低応力域での変形が大きく、応力が高くなるにつれ変形が減少する下に凸の顕著な非線形性を示す。特に 1 回目の載除荷時の変位と残留変位が大きい。そのため、1 回目の垂直剛性は小さく、以降は繰返し回数とともに徐々に大きくなり、ある値に収束する傾向を示す。

- ⑤ 今回の実験に用いた天然亀裂程度の粗さと面の強度の亀裂であれば、フラクタル次元による粗さの定量化とシュミットハンマーの測定結果から BB モデルで力学特性をある程度推定できる。

3 種類の天然亀裂しか試験していないので今後も機会があれば天然亀裂を採取し、データを蓄積してゆく予定である。

<参考文献>

- 1) 山辺正, 原夏生, 小田匡寛: "クラックテンソルによる節理性岩盤の弾性変形解析と入力パラメータの決定に関する研究", 土木学会論文集, No.382/III-7, pp121-130, 1987.
- 2) 奥井義昭, 堀井秀之, 秋山成典: "マイクロメカニクスに基づく連続体理論と変形の局所化現象の解析", 土木学会論文集, No.501/I-29, pp55-64, 1994.
- 3) 京谷孝史, 市川康明, 川本暁方: "岩盤の力学特性評価における損傷テンソルの適用について", 土木学会論文集, No.358/III-3, pp27-35, 1985.
- 4) G. H. Shi and R. E. Goodman: "Discontinuous deformation analysis", Proc. 25th U.S.Symposium on Rock Mechanics, pp269-277, 1984.
- 5) Cundall, P.A.: "A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems", Proc.Symp.Int.Rock Mech., Vol.1, II-8, 1971.
- 6) "ISRM 指針 Vol.3 岩盤不連続面の定量的記載法", 岩の力学連合会, 1985.
- 7) 吉中龍之進ら: "岩盤不連続面の粗さの指標について", 第 19 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp386-390, 1987.
- 8) 谷本親伯, 岸田潔ら: "岩盤不連続面のせん断特性とラフネスに関する基礎的研究", 第 24 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp206-210, 1992.
- 9) "フラクタル", 高安秀樹, 朝倉書店, 1986.
- 10) 平田隆幸: "断層とフラクタル", 物理探査, 第 41 巻, 第 6 号, pp401-408, 1988.
- 11) 若林成樹, 福重都緒: "岩石不連続面のフラクタル次元とせん断強度に関する実験的研究", 第 23 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp132-136, 1991.
- 12) Lee Y.H. et al.: "The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.&Geomech. Abstr.* Vol. 27, No.6, pp453-464, 1990.
- 13) S.C.Bandis, A.C.Lumsden and N.R.Barton: "Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.& Geomech. Abstr.* Vol.18, pp.1~21, 1981.
- 14) S.C.Bandis, A.C.Lumsden and N.R.Barton: "Fundamentals of rock joint deformation", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.&Geomech. Abstr.* Vol. 20, No.6, pp249-268, 1983.
- 15) N.Barton, S.Bandis and K.Bakhtar: "Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.&Geomech. Abstr.* Vol. 22, No.3, pp121-140, 1985.