

## 画像解析を利用したトンネル切羽の割目定量評価技術

## A Quantitative Method Applying Image Analysis for Determining Crack Distribution and Interval on Tunnel Faces

戸 邊 勇 人 白 鷺 卓  
川 端 淳 一 宮 嶋 保 幸

## 要 約

山岳トンネルの工事で適切な施工を行うためには、岩盤強度、風化変質程度とともに、割目の配置の情報を迅速かつ正確に評価することが重要である。現在、一般的に行われる切羽評価は、観察者による目視観察を中心とするため評価に個人差が生じやすい。この個人差を解消するため、近年、レーザ測量や写真測量の技術を応用した、割目の定量的な評価法が開発されてきている。これらの評価法は、正確な評価を行える反面、解析に時間を要するため迅速な評価を行っていく。これらのことから、個人差無く、簡便かつ迅速に岩盤の割目評価を行うための手法として、画像解析による割目の定量的解析法を開発した。この手法は、切羽を複数の領域に区切り、その領域内の画像を回転させながら、主要な割目の方向を数値的に読み取ることを特徴とする。この手法を現場に適用した結果、1分程度の解析時間で、割目の卓越方向および間隔を効果的に抽出することができた。

## 目 次

- I. はじめに
- II. 割目の解析法
- III. 現場への適用
- IV. おわりに—今後の課題—

## I. はじめに

山岳トンネルの工事において適切な施工を行うためには、正確かつ迅速な切羽評価が重要である。従来の切羽評価では、岩盤の強度、風化変質の程度、主要割目の配置（方向や間隔）などの項目を一定の基準に則り点数化するものの、観察者の違いによる個人差（ばらつき）が生じやすい。この個人差を解消するためには、観察者の目視だけによらない定量的な解析法の開発が必要である。

切羽評価の項目のうち、岩盤の強度と風化変質の程度については、近年の技術により簡便な定量解析が可能になってきている。すなわち、岩盤の強度については、点載荷試験などの原位置試験により定量測定が可能である。また、風化変質の程度については、色調分析とX線回折分析をあわせた解析により、定量的な測定が実現されている<sup>1)</sup>。

これらに対し、割目の配置については、レーザ測量や写真測量による割目の走向傾斜の検出法が開発されている<sup>2)</sup>。これは、高い精度を有する優れた手法であるが、計測や解析に要する時間の問題がある。すなわち、掘削作業を中断して計測を行うため、施工サイクルへの負担が大きくなる。また、この解析法では、測量により取得した切羽形状をもとに、割目の卓越方向を1筋ごとに解析するため、

数10分～数時間程度の解析時間を要し、原位置において割目の方向や間隔を個人差無く示す目的としては、やや大掛かりなシステムとなっている。

これらのことから、筆者らは、施工サイクルへの負担がなく、切羽観察の個人差を解消することを主目的とした、簡便かつ短時間に切羽の割目の定量解析を行う手法として、切羽写真の画像解析による定量化手法の開発を行った。

画像処理による切羽の解析法としては、これまでも切羽写真の割目をフラクタル解析する方法が提案されている<sup>3)</sup>。この手法は、比較的短時間に切羽の割目配置を定量化できるが、フラクタル次元は、現場作業者が直感的に把握しやすい手段として必ずしも適していなかった。フラクタル次元以外の方法で、岩石内の割目や鉱物の並び方などの岩石組織を定量的に解析する方法としては、ほかにも様々な方法が既往研究によって提案されている。これらの研究は、主に岩石学において行われてきた。その理由は、岩石の生成過程の推定を行う際に、割目（節理）の分布、鉱物の多寡、および鉱物結晶の配列などを解析<sup>4)</sup>するためである。岩石内の割目の分布は、たとえば長田ほか<sup>5)</sup>のようにレプリカフィルムを用いて数値解析する方法が挙げられる。鉱物の多寡や配列を解析する方法としては、たとえば画像処理によるモード測定<sup>6)</sup>、鉱物の3次元的な連結性の再現法<sup>7)</sup>、楕円近似による岩石組織定量化法<sup>8)</sup>などが挙げられ、これらのパラメータを比較した総合的な岩石組織の定量化の研究も行われている<sup>9)</sup>。

こうした数多くの既往研究において開発・提案された定量化手法は、岩石の不均一性を捉えることについて、大きな成果を挙げてい

**キーワード:** 割目, 定量解析, 画像解析, トンネル掘削

**Keywords:** crack, quantitative analysis, image analysis, tunneling

る。しかしながら、切羽評価において最も重視すべき項目は、割目の方向と連続性である。これらの特性を定量化するに際しては、割目の配列方向とつながり方を、直感的に理解しやすい指標で表現できる数値解析法が必要であるが、既往研究における手法は、この目的には必ずしも適していなかった。

本研究では、パーコレーション理論に基づいた、岩石内の鉱物の連結性を直接に定量化する方法を応用し<sup>10)</sup>、切羽の画像を回転させながら割目の連結性を比較することにより、割目の卓越方向を検出する手法を開発した。パーコレーションは、フラクタル解析をはじめとする複雑系科学の一分野であり、要素間のつながり方を解析するための基本原理を研究する分野である<sup>11)</sup>。今回開発した手法では、測定にデジタル処理が必要であったため、切羽の割目をデジタル画像化する方法も合わせて開発した。

開発にあたっては、通常の日視観察の道具のみを用い、また、現場作業者に理解しやすい結果が得られる手法とすることを趣旨とした。この解析法を現地に適用した結果、約1分程度の時間で、割目の卓越方向や間隔を定量的に検出できた。本研究では、この手法の理論と現場での適用結果について報告する。

## II. 割目の解析法

### 1. 切羽画像からの割目抽出

岩盤内に存在する割目は、成因により節理・劈開・せん断面など、いくつかの種類に分類されるが、いずれも岩盤内の力学的な弱面であることに変わりなく、切羽評価では一括して扱われる。本研究でも成因を区別せず、力学的な弱面を一括して「割目」として扱う。

岩盤は、掘削により表面に露出すると、応力解放により力学的な弱面である割目を境界として分離しやすい。そのため、掘削直後の切羽では、割目面が凹凸をもった筋をなしている。この状態の切羽に照明を当てると、光が凸部で反射しやすく凹部で反射しにくいいため、割目は輝度の差が大きい部分として発現しやすい。

この性質を利用し、大きく輝度の変化する部分を白いピクセル、それ以外を黒いピクセルとして切羽写真を2値化した画像に変換すると、割目は白色の線状構造として抽出される (Fig.1)。この割目について、卓越する方向と連続性を数値解析する。

撮影時には切羽から一定の距離で照明を当て、同一の絞り、感度、シャッター速度で撮影を行い、撮影条件の差異が割目の解析結果に影響を及ぼさないように努めた。

### 2. 割目の連結率の計算

2値化した画像から割目の配置を定量的に抽出するには、まず、画像内の多数の割目から主要な割目を一定の基準で選別するアルゴリズムを構築する必要がある。このアルゴリズムは、目視観察との整合性を保つため、目視観察の手順に沿う方法となるように留意した。

目視観察において最初に観察者が行うことは、まず切羽全体を観察し、長い割目を見出すことである。その後、観察者は長い割目の周辺に観察範囲を狭め、長い割目に対して短い割目が平行に近い方向を示すか、あるいは交差するのかを判断する。そして、それらの割目の多寡を把握し、割目の間隔を目視で読み取る。最後に、割目の位置をスケッチし、目測の間隔とともに切羽観察簿に記録する。

この目視観察の手順を定量化するために必要なパラメータを以下



Fig.1 切羽写真から割目を抽出  
(Extraction of Cracks on a Face)

に定義する。すなわち、割目の連続性の高低を定量的に示す数値を「連結率」、観察する範囲を「観察域」とする。このように定義すると、目視観察において切羽を広い範囲で観察した後に観察の範囲を狭める作業は、割目の定量解析では、画像中の観察域を変化させながら連結率を計算するアルゴリズムに置き換えることができる。このアルゴリズムについて、以下に詳しく述べる。

解析手法の説明の簡単のため、1辺20ピクセルの割目画像を用いる (Fig.2(1))。この画像では、割目は白のピクセルとして示されている。画像全体を把握するために、観察域を画像全体 (=20ピクセル) とした場合、上端から下端まで連続した割目が存在していない。このことは、目視観察に置き換えれば、20ピクセル以上の長さで上下方向に連続している割目はないと判断する行為と同等である。

次に、目視観察で観察範囲を狭める作業と同様に、画像を1辺10ピクセルに分割して観察域を小さくしてみる。すると、4つの枠のうち黄色で網掛けをした1つの枠内のみ、枠の上下端に連続した割目が存在する (Fig.2(2))。このとき、当該画像において、1筋以上の割目が10ピクセル以上の長さで上下に連続している割合は $1/4=0.25$ と近似的に見なすことができる。同様に、画像を5ピクセルに分割した場合には、16枠中、赤色で網掛けをした8枠において、上下端に連続した割目が確認されるため、 $8/16=0.5$ の割合で割目が連続していると見なせる (Fig.2(3))。このとき、割目の連続の割合を「連結率」、画像の分割の大きさを「観察域」とすると、観察域20ピクセルの連結率=0、観察域10ピクセルの連結率=0.25、観察域5ピクセルの連結率=0.5と定量化できる。連結率は、1つの割目が長く連続しているほど、また、短い割目でも同様の方向を示す割目が多く内在されているほど高い値を示す。

このように連結率と観察域を導入することで、割目の連続する長さ、類似する方向を示す割目の多寡を定量化できる。また、定量

化により、異なる切羽間の割目の連続性が比較できる。たとえば、同じ観察域のときに、切羽 A の連結率が 0.5 で、切羽 B の連結率が 0.25 であった場合、切羽 A における割目の連続性は B の 2 倍とみなせる。

このような作業は、目視観察においても切羽スケッチの時などと同様の過程で行っているが、その結果は定性的であり、本研究のアルゴリズムのように連結率として数値化できていなかった。

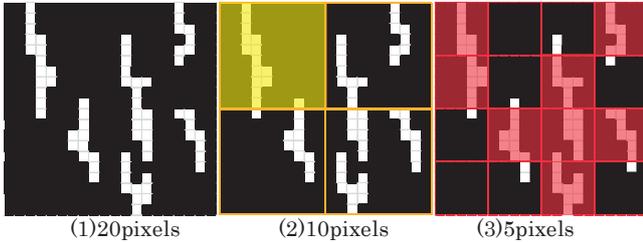


Fig.2 連結率の計算法  
(Calculation Method of Connection Rate)

### 3. 主要割目の卓越方向の検出法

連結率は、上下方向に割目の繋がり方を判断して算出するため、与えられた画像が同じであっても、画像の向きによって異なる連結率が算出される。すなわち、連続性・間隔ともに同等で、方向のみ異なる割目画像を解析すると、画像内の割目の多くが上下方向を向いている場合に、最大の連結率が算出される。このことを利用して、切羽画像における割目の卓越方向を検出することができる。すなわち、切羽画像を回転しながら連結率を計算したとき、切羽内の割目が最も上下方向を示したときの切羽画像が、最も高い連結率を示すと考えられる。

このことを実際の解析プログラムに組み込んだ際に定量的に検出可能であるかを確認するため、500×500 ピクセルの大きさの画像に、幅 10 ピクセル、間隔 10 ピクセルの縞状の人工割目を作成した。そして、この画像を左回転させながら (Fig.3)、前述のアルゴリズムに基づいて、各々の連結率を算出した。

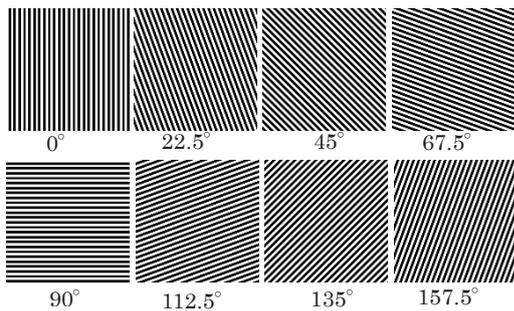


Fig.3 人工割目画像 (Images of artificial cracks)  
図の下の数字は回転角を示す  
(Rotation Angles are Indicated under Images)

その結果は Fig.4 に示すとおりであり、回転角 0° の人工割目画像では、観察域の増大とともに連結率が増加し、観察域 11 ピクセルで連結率 1 に収束した。回転角 22.5° の画像も、回転角 0° と同様の傾向を示したが、回転角 0° に比べると連結率が小さく、連結率 1 への収束も回転角 0° より大きい領域 (16 ピクセル) となった。

回転角 45° の連結率は、0.5 付近を維持した。回転角 67.5° では、回転角 22.5° と対照的に、観察域増大とともに連結率が減少し、16 ピクセルで連結率 0 に収束した。回転角 90° でも同様の傾向となり、全体的に最小の連結率が示された。90° 以上の回転角では、112.5° と 67.5°、135° と 45°、157.5° と 22.5° で、それぞれ同様の傾向を示した。連結率は上下の繋がり方を調べるアルゴリズムによって算出するため、回転角 0° の画像の連結率が、全体的に高い傾向を示すことは当然であるが、アルゴリズムに基づいて作成したプログラムの実行により、そのことを確認することができた。

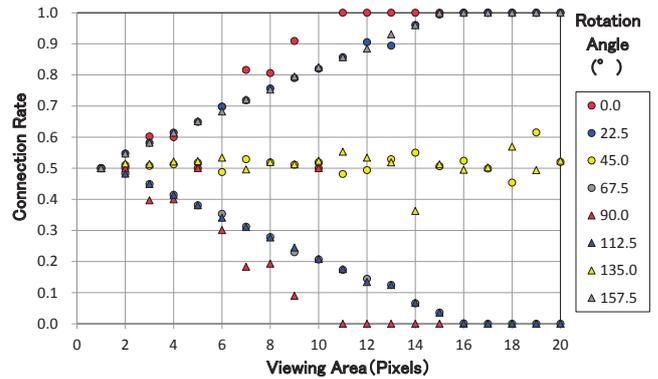


Fig.4 人工割目の連結率算出結果  
(Result of Connection Rate of Artificial Cracks)

つぎに、回転角間で連結率を数値的に比較するために、連結率の合計値を算出する。合計値は、連結率を実測値から多項式近似によって数式化し、その定積分から算出する。

説明を簡単にするため、Fig.3 の回転角 0° の人工割目を用い、合計値の算出法を例示する。前述のように、連結率は、観察域の大きさによって変化するため、観察域を独立変数  $x$ 、連結率を従属変数  $y$  とすると、 $y = f(x)$  が得られる。この式は、実測の連結率に近い値を取ると考えられるため、実測値を曲線近似したときの式と同様とみなせる (Fig.5)。

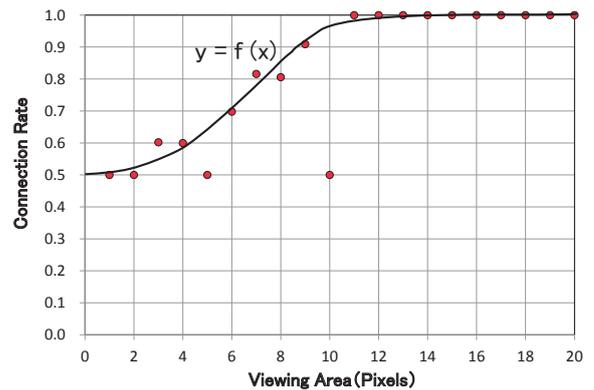


Fig.5 連結率の近似式化  
(Approximation Formula of Connection Rate)

数式化により、回転角の異なる画像間で、連結率の合計値を定量的に比較できる。すなわち、上述の方法で  $y = f(x)$  を導き、その定積分  $\int_0^k f(x) dx$  を求めると、この値は、観察域 0 から観察域  $k$  までの間の実測の連結率を総合計した値と近似的にみなせる。本研究ではこの積分値を「積分連結率」と呼ぶ。

この積分連結率は、k を一定にして、同一の画像を回転した場合、画像中に含まれる割目が最も多く上下方向を向いた場合に最大の値を取ると考えられる。ここでは、k=20 に固定して、積分連結率と回転角の関係と比較した (Table 1)。その結果、積分連結率は、回転角 0° で最大を示しており、Fig.4 から読み取れる印象と整合的であった。このことから、切羽内の割目の卓越方向を定量的に検出するためには、最大の積分連結率を示す画像の回転角を求めればよいと判断された。この積分連結率を、以後 RCT 値と呼ぶ (Rate of integral ConnecTion)。

Table 1 各回転角における RCT 値  
(RCT Value at Each Rotation Angle)

Rotation angle	RCT value	Rotation angle	RCT value
0	16.40	90	3.56
22.5	16.19	112.5	4.27
45	10.26	135	10.19
67.5	4.27	157.5	16.21

#### 4. 実際の切羽画像における割目卓越方向の検出

今まで述べた一連の解析は、PC 上に専用のプログラムを作成して実施した。プログラムは、Windows 上で実行した。1 回の解析時間は 2.70GHz のノート PC で 1 分程度であった。

これらの器具およびプログラムを用いて実際に撮影した切羽写真を解析した例を示しながら、その解析結果の確認を行う。

Fig.6 は、Fig.1 に示した切羽写真の割目卓越方向を解析したものである。切羽の解析結果は、実測で約 100cm となる間隔にメッシュを区切り、そのメッシュの大きさに区切った画像を回転させながら、RCT 値を算出し、最大の RCT 値を示した回転角を、割目の卓越方向としてメッシュ内の赤線で示した。また、メッシュ内の赤線 (以降「ケバ」と呼ぶ) の長さは、RCT 値の相対的な大きさを表す。そのため、ほかのメッシュに比べて長いケバを示すメッシュは、相対的に高い連続性をもつ割目を内在しているといえる。

Fig.6 には、割目の解析画像の中央付近から代表的なメッシュを抜き出し拡大したものと、切羽写真からそのメッシュに対応する位置の拡大画像を抜き出したものもあわせて示した。この両者を比較すると、切羽の割目が白い点として抽出できていることが確認できる。また、メッシュ内に示されているケバが、割目の卓越する方向 (水平やや右上がり方向) を捉えていることも確認できる。これらのことから、本研究の方法により、主要割目の卓越方向は、問題なく抽出できることがわかった。

#### 5. 割目間隔の検出

次に、切羽写真を 2 値化した画像から、割目の間隔を算出する方法を述べる。目視観察において割目の間隔を読み取る際には、観察する領域 (=観察域) を決めた後、主要な割目に直交する向きに割目の本数を読み取りながら間隔を判断する。したがって、本研究においても、この目視観察と同様の手順となるようにアルゴリズムを構築した。すなわち、主要な割目の向きは、前述の割目の卓越方向と同様であるため、割目の卓越方向に直交する向きに、観察域内に含まれる割目の本数を読み取った。これにより、目視観察と整合的な方法で定量的な割目間隔の算出が可能と考えた。

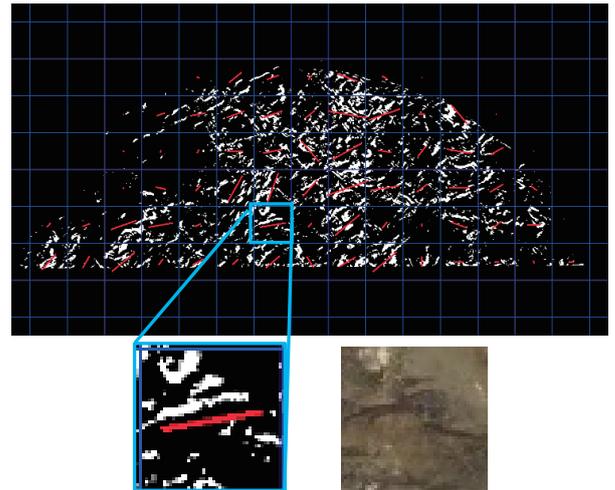


Fig.6 実際の切羽の卓越方向解析例

(Analysis Example of Principal Crack Directions on a Face)

その具体的な検出方法は Fig.7 に示すとおりである。Fig.7 では説明を簡単にするため、割目の卓越方向が上下方向であり、観察域の大きさが 20×20 ピクセルである画像を例に用いた。

割目間隔を目視観察で判断する際には、観察者は最も割目間隔が狭いところに着目するため、本研究の画像解析法においても、目視観察と同様に、観察域内で最小となる割目間隔を代表値とすることにした。Fig.7 では、この観察域を横方向に走査する場合、割目の横断回数は常に 4 ではなく、上端付近では 2、下端付近では 1 になる。一方、目視観察で割目間隔を判断する際には、最も割目が集中している部分に注目するため、Fig.7 であれば着目点は中央付近の横断回数最大となるところが注目すべき箇所となる。そのため、本研究でも、観察域内で最大の横断回数を示す箇所を採用し、その最大横断回数 4 で観察域 20 ピクセルを割った値 (=最小値) を、その観察域の割目間隔の代表値とした。

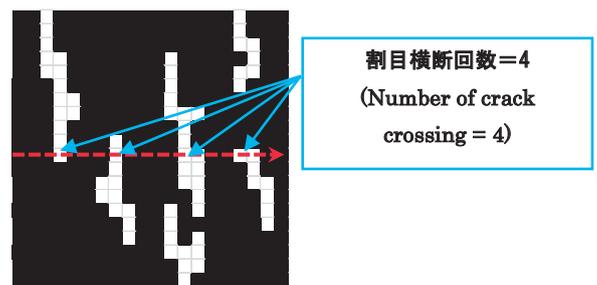


Fig.7 割目間隔の算出法

(Calculation Method of Crack Interval)

#### 6. 適切なメッシュ幅の設定

前述の方法で実際の切羽の画像を解析する際には、解析のメッシュ幅を適切に設定する必要がある。そのため、割目の卓越方向を定量測定する場合に適切なメッシュの幅と、割目の間隔の測定に適切なメッシュ幅を決定する方法について検討した。

##### (1) 卓越方向の抽出に適したメッシュ幅

割目の卓越方向の解析に適したメッシュを設定する手順については、基本的には小さいメッシュ幅であるほど定量解析に適している

と考えられる。この理由は、切羽の中には、あらゆる長さの割目が混在していると考えられるため、割目の長さに比べて大きすぎるメッシュ幅を設定すると、短い割目の連結率がほかの長い割目に打ち消されてしまい、短い割目の卓越方向が検出されにくくなると考えられるためである。その一方で、メッシュ幅が小さすぎる場合には、割目の卓越方向や連結率が正しく算出されないと考えられる。極端な例として、メッシュ幅=1ピクセルとした場合には、割目の卓越方向やRCT値が計測できない。また、メッシュ幅=2ピクセルとした場合でも、卓越方向は左右、上下、左斜、右斜の4方向しか検出できない。したがって、適切なメッシュを選択するには、割目の特徴を捉えることができるメッシュの中で、最小のものを用いることが適切と考えられる。

上記のことを踏まえ、Fig.1に示した切羽写真を用い、400,200,100,50,25,20,15,10,5ピクセルの各メッシュで、RCT値を計算した例をTable 2に示す。この結果は、解析で求められた全切羽のRCT値の合計値を100%として、それぞれの卓越方向に占めるRCT値の割合を百分率で示したものである。すなわち、このRCT値が最大となる方向は、その切羽で最も卓越する割目が多い方向である。また、最大値と最小値の差が小さい場合には、そのメッシュは卓越方向を検出できないといえる。このことを利用して最適なメッシュ幅を決定する。

Table 2に示したように、卓越方向に占めるRCT値の割合をメッシュ間で比較すると、小さいメッシュでは卓越方向間の差が小さいことがわかった。すなわち、メッシュ幅5ピクセル、10ピクセル、15ピクセルでは、最大値と最小値の差がそれぞれ0.7%,1.7%,2.0%と他のピクセル幅に比べると小さい差となった。一方、20、25ピクセルでの最小RCT値と最大RCT値の差は、おおむね3%程度であり、50ピクセル以上では3~4%前後を示していた。このことから、20ピクセルより大きいメッシュでは、割目の連続性を把握している程度に大きな差がなくなっていると判断される。前述のように、短い割目の取りこぼしを防ぐにはメッシュ幅を小さくすることが適切であるため、20ピクセルをメッシュ幅に採用することが適切であると考えられる。

割目の連続性や間隔は一定とは限らないため、適切なメッシュ幅も一定とは限らない。そこでFig.1の切羽と同様の地質を示す複数の切羽でも解析を行ったところ、Fig.1と同様に20ピクセルが最適な結果となった。そのため、少なくとも同様の地質を対象とする場合には、最適なメッシュ幅は同一とすることが可能と考えられる。

(2) 割目間隔の抽出に適したメッシュ幅

割目間隔を測定する場合には、把握する必要がある最大の割目間隔によって、採用すべきメッシュ幅が決定される。すなわち、100cm以上の割目間隔を計測する場合、メッシュ幅が100cmないと100cm以上の割目幅を把握できない。切羽観察記録簿には様々な様式があるが、広く使われているNEXCO様式や国土交通省様式では100cm以上の割目間隔まで把握する必要があるとされているため、本研究においても割目間隔を計測する際のメッシュは100cm幅を採用する。本研究では1ピクセル=1cmの解像度で解析を行うため、メッシュ幅も100ピクセルとした。

Table 2 メッシュごとのRCT値の割合  
(Percentage of RCT Value in Each Mesh Size)

Angle of Principal Crack (°)	Size of Mesh(pixel)									
	5	10	15	20	25	50	100	200	400	
0	5.9	6.2	6.1	6.4	6.8	6.1	6.7	6.1	6.3	
10	5.9	5.9	5.8	5.8	6.0	6.1	5.7	5.4	5.5	
20	5.7	5.7	5.7	5.5	5.4	5.3	4.8	4.8	5.1	
30	5.4	5.3	5.3	5.0	4.8	4.4	4.7	4.9	5.0	
40	5.6	5.0	4.9	4.7	4.6	4.2	4.7	5.0	4.0	
50	5.2	5.0	4.7	4.5	4.2	4.2	4.1	4.5	3.9	
60	5.4	4.7	4.7	4.4	4.1	4.0	3.8	4.8	4.3	
70	5.3	5.0	4.7	4.2	4.2	3.7	3.8	4.1	4.2	
80	5.2	4.8	4.7	4.4	4.2	4.1	4.0	3.8	3.6	
90	5.2	4.9	4.7	4.5	4.7	4.1	4.2	4.3	4.1	
100	5.2	5.2	5.1	5.0	5.0	4.4	4.9	6.6	4.7	
110	5.5	5.5	5.7	5.4	5.6	5.6	5.8	5.5	5.1	
120	5.4	5.7	6.0	5.7	5.8	6.2	5.9	6.2	6.1	
130	5.8	5.8	6.2	6.5	6.5	6.7	7.2	6.5	6.7	
140	5.6	6.2	6.4	7.0	7.1	7.2	7.2	7.1	7.4	
150	5.9	6.1	6.5	7.2	7.1	8.0	8.1	7.1	8.1	
160	5.8	6.5	6.5	7.1	7.2	8.1	7.4	6.8	8.1	
170	5.8	6.3	6.3	6.8	6.9	7.5	7.0	6.7	7.6	
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Max	5.9	6.5	6.5	7.2	7.2	8.1	8.1	7.1	8.1	
Min	5.2	4.7	4.7	4.2	4.1	3.7	3.8	3.8	3.6	
Max-Min	0.7	1.7	1.8	3.0	3.1	4.4	4.3	3.3	4.5	

III. 現場への適用

1. 割目卓越方向とスケッチとの比較

現場の切羽の解析例として、Fig.1に示した切羽写真を解析した(Fig.8(a))。また、その結果を検証するために、同一切羽のスケッチも示した(Fig.8(b))。図中の薄青線は、解析結果から判断した主要割目の位置であり、これをスケッチと比較すると、完全ではないものの、主要割目の方向と切羽内の相対的な位置について一致が認められた。そのため、主要割目の解析結果をスケッチの補正や代替に用いることも十分可能と考えられる。なお、この解析に要した時間は1分未満であった。

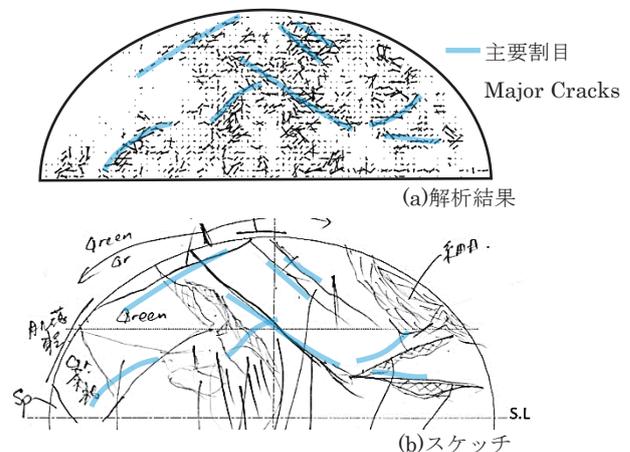


Fig.8 Fig.1に示した切羽写真の割目卓越方向検出結果  
(Result of Detecting Principal Cracks on the Face of Fig.1)

2. 割目間隔の算出結果

画像解析による割目間隔の算出結果をTable 3に示す。これによると、目視観察による割目間隔の測定結果と一致する切羽が多いが、No.633, No.647切羽などの一部に、目視結果=4(間隔:20~5cm)より広い結果=3(間隔:50~20cm)を示すものがあった。

この差の原因は、割目の算出方法によると考えられる。すなわち、目視観察では細かい割目に着目するとき、観察範囲も狭めて目測するが、画像解析では固定(メッシュと同じく100ピクセル)である。

そのため、切羽に細かい割目が集中している小さい部分があったとしても、画像解析ではメッシュが固定であるため、間隔値はほかの割目との平均値となる。このため、目視観察に比べると画像解析では、割目間隔が大きい結果になりやすいと考えられる。この問題を解決するため、割目間隔の計測ではメッシュ幅を 100 ピクセルだけとせず、小さいメッシュも併用する方法を検討中である。

Table 3 切羽での割目間隔測定結果  
(Index of Crack on Each Face)

Face No.	Observation			Image Analysis		
	Left	Center	Right	Left	Center	Right
629	3	4	3	3	4	3
633	3	4	3	3	3	3
637	3	4	3	3	4	3
641	4	4	3	4	4	3
647	3	4	3	3	3	3
651	4	4	4	4	4	4
656	4	4	4	4	4	4
660	4	4	4	4	4	4
664	3	4	4	3	4	4

Faces Mesured at Wider Interval  
in Image Analysis

Legend	Index of Crack Interval	1	2	3	4	5
	Interval (cm)	$\geq 100$	100 ~ 50	50 ~ 20	20 ~ 5	<5

#### IV. おわりに—今後の課題—

本研究では、通常の切羽観察に用いるカメラや照明のみを使い、切羽の割目の卓越方向と間隔を検出する手法を開発し、現地に適用した。その結果、切羽の割目の卓越方向および割目間隔を定量的かつ迅速に検出することができた。

今後の課題は、この測定法の応用である。まず、割目の方向と間隔が定量化できたため、切羽観察記録簿の自動作成法を開発することが考えられる。そのほか、切羽作業における安全管理に本研究の方法が応用できると考えられる。すなわち、切羽作業ではとくに割目の発達している切羽において、切羽からの剥落が安全管理上問題になるが、現状では、この危険の判断は切羽監視員に大きく依存している。

そこで、本研究のシステムにより割目を迅速に定量解析し、剥落の危険性のある場所の予測を現場にフィードバックすることにより、剥落の危険の見落としを防ぐ効果が期待できると考えられる。

今後は、こうした現場の生産性と安全性の向上に寄与する応用方法を視野に入れて、技術の発展を行う所存である。

#### 参考文献

- 戸邊真人ほか;山岳トンネル切羽の風化変質判定システムの開発—切羽観察での適用例—, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), Vol.69,2014,pp.VI-043.
- 石濱茂崇ほか;切羽における不連続面の 3 次元計測システムの開発と現場適用事例, 応用地質, Vol.56, No.6, 2016, pp.316-324.
- 宇田川義夫;トンネル切羽画像のフラクタル解析による地質評価手法の開発, 応用地質, Vol.48, No.3, 2007, pp.116-125.
- 池田進ほか;岩石組織の画像解析—その自動化における現状と問題点—, 鉱物学雑誌, 第 26 巻, 第 4 号, 1997, pp.185-196.
- 長田昌彦ほか;レプリカフィルムからのクラック抽出方法とその画像解析方法の検討, 応用地質, Vol.40, No.1, 1999, pp.36-46.
- 西本昌司;画像処理ソフト” Adobe Photoshop™” を用いた花崗岩質岩石のモード測定, 岩鉱, Vol.91, 1995, pp.235-241.
- Bryon, D. N., et al.; The interpretation of granitic textures from serial thin sectioning, image analysis and three-dimensional reconstruction, Mineralogical Magazine 95, 1995, pp.203-211.
- 中野司ほか;” GRAIN” と” EDGE” —粒子画像解析のためのソフトウェア—, 情報地質, Vol.13, 1988, pp.93-117.
- Heilbronner, R. and Keulen, N.; Grain size and grain shape analysis of fault rocks, Tectonophysics 427, 2006, pp.199-216.
- 戸邊真人, 千木良雅弘;花崗岩類における鉱物のつながり方の定量的測定法とその適用例, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 2006, pp.291-294.
- 高安秀樹ほか;フラクタル科学, 朝倉書店, p.258.

## A Quantitative Method Applying Image Analysis for Determining Crack Distribution and Interval on Tunnel Faces

Hayato Tobe, Suguru Shirasagi, Jun-ichi Kawabata and Yasuyuki Miyajima

Proper construction of tunnels requires accurate determination of the distribution of cracks, as well as rock strength and weathering grade. However, since such determination is usually based on visual inspection of the tunnel face, it is often inaccurate. Although quantitative evaluation methods such as laser measurement and photographic surveying have been applied to solve this problem, they are time consuming and cannot always provide quick determination. The authors have therefore developed based on image analysis a simple and rapid quantitative analysis method to determine crack distribution and interval without dispersion. In this method, the tunnel face is divided into regions, and images of these are rotated and read numerically to determine the direction of the main cracks and their intervals. The authors used the method at a tunneling site and were able to obtain results in about one minute.