

フラクタルを応用したトンネル切羽画像解析・

前方地質予測システム

IMAGE-ANALYZING AND GEOLOGY-PREDICTING SYSTEM FOR A TUNNEL FACE BY USING FRACTAL

宇田川 義夫¹⁾・岩田 広己²⁾・都 昌平³⁾

Yoshio UDAGAWA, Hiroki IWATA and Syohei MIYAKO

The stability of constructing tunnels at jointed rocks is susceptible to geological characteristics depending on the extent of cracking and weathering. Thus, the prediction of geological characteristics of these rocks ahead of a tunnel face is very important both from a safety hazard point of view and economical construction. We have developed an image-analysis system that can detect the locations of fault-shatter zones in the tunnel at an early stage of construction. A distinctive feature of this system is its ability to detect geological changes directly by digitizing geological information. And, another distinctive feature of this technique is the possibility of conducting a real time analysis by using a digital camera to observe the tunnel face without halting construction.

Key Words: tunnel, image-analysis, fractal, fault-shatter zone

1. はじめに

山岳トンネルは線状構造物であり、延長が長いこともあり、施工前の地質調査においては、経済性との関連において十分な調査がおこなわれていないことが多い。このため、トンネル掘削において、予期せぬ地質に遭遇し、落盤、出水等の事故が発生することが少なくない。このような事故は、死亡災害・工期の大幅な遅れ等をもたらし、安全性・経済性において、トンネル工事の大きな障害となっている。

亀裂性岩盤において施工されるトンネルの安定性は、その岩盤中の亀裂の発達程度(亀裂密度)や風化度などの地質的要因に大きく支配されている。したがって、トンネル工事において切羽前方の地質状況を事前に把握することは、トンネルを安全かつ経済的に施工する上で重要である。このシステムでは、地質現象のなかでも問題の多い「断層破砕帯」の予測に重点を置き、トンネル工事の障害となる「断層破砕帯」の位置を早期に予測し、工事の安全性・経済性の向上を図るものである。

トンネル切羽画像解析・前方地質予測システムは、パソコン上でトンネル切羽の画像処理とフラクタル次元解析を行うことにより、これらの地質情報(亀裂密度、風化度)を客観的な数値(フラクタル次元)で評価し、その数値からトンネルの安定性評価を行ったり、その数値の切羽ごとの変化から地質構造の変化を察知し、トンネル切羽前方の地質(断層破砕帯)を事前に予測するものである。

1) 正会員 博士(理学) (株)フジタ 技術本部技術研究所土木研究部

2) 正会員 修士(工学) (株)フジタ 九州支店土木部

3) 正会員 (株)フジタ 九州支店土木部

2. システムの概要

トンネル切羽画像解析・前方地質予測システム¹⁾は、パソコン上でリアルタイムにトンネル切羽の画像処理とフラクタル次元解析を行うことにより、切羽の地質情報(亀裂密度、風化度)を客観的な数値(フラクタル次元)で評価し、切羽ごとの数値の変化から地質構造の変化を察知し、トンネル切羽前方の地質(断層破砕帯)を事前に予測するものである。システムの理論的ベースは宇田川(1994,1996)^{2) 3)}が提案した「断層破砕帯のフラクタル構造モデル」(図1)に基づいている。このモデルは、断層破砕帯を主変位面からの距離とフラクタル次元との関係によってモデル化したもので、断層破砕帯近傍では切羽のフラクタル次元が断層破砕帯に近づくにつれて増大するような傾向がある。その関係は(1)式で表される。またフラクタル次元が増大する割合を「フラクタル次元変化率 δ 」((2)式)と定義した。

$$D = -\delta L + \gamma \quad (1)$$

$$\delta = |\Delta D / \Delta L| \quad (2)$$

ここで、 D はフラクタル次元、 L は断層破砕帯中央部から解析領域までの距離を表す。また、 γ は断層破砕帯のフラクタル次元を表わし、断層の成熟度につれて1.6~1.7程度に収束する値である。

トンネル切羽画像解析システムは、パソコン上でリアルタイムにトンネル切羽の画像処理とフラクタル次元解析を行うことにより、切羽の地質情報(亀裂密度、風化度)を客観的な数値(フラクタル次元)で評価し、切羽ごとの数値の変化から地質構造の変化を察知し、トンネル切羽前方の地質(断層破砕帯)を事前に予測するものである。

トンネル切羽画像解析・前方地質予測システムの解析ステップは大きく、①画像処理、②フラクタル次元解析、の2段階に分けられる。第1段階「画像処理」では、トンネル切羽画像から必要とする地質情報(亀裂、風化脆弱部)のみを抽出する(図2、図3)。第2段階「フラクタル次元解析」では、抽出されたトンネル切羽の地質情報(亀裂、風化脆弱部)を客観的な数値(ボックスカウンティング法によるフラクタル次元)として評価する(図4、図5)。

これらの解析により、トンネル切羽の地質情報が「フラクタル次元」という客観的な数値で評価され、(1)式の関係をもとにトンネル切羽前方の地質予測が可能となる。すなわち、トンネル切羽進行に伴って明らかにフラクタル次元の増加傾向が認められるとき、その切羽進行距離に応じたフラクタル次元変化の割合(フラクタル次元変化率 δ)を(2)式から近似的に求め、(1)式から切羽前方 L mに断層破砕帯の存在が予測できる。

トンネル切羽画像解析・前方地質予測システムは、Apple社のパソコンMacintoshシリーズ(CPU/PowerPC)を使用し、ソフトウェアは「Adobe Photoshop 3.0J」、「FDC(Fractal Dimension Calculator)」、「Microsoft Excel」を使用した。このシステムはデジタルカメラを使用することにより現場でのリアルタイムな解析が可能であり、操作は容易に出来、解析時間は1切羽につき約10~15分程度である。

3. システムの適用事例

システムを適用したトンネルは、大分県に施工中の上尾トンネル($L=661.3$ m)で、現場で日常の切羽観察の一環で撮影されたトンネル切羽写真を用いて解析を実施した。トンネルの地質は中生代白亜紀大野川群群犬飼層の砂岩・頁岩・礫岩などの亀裂性岩盤が分布している。解析結果は、「切羽距離-フラクタル次元相関図」(図6)に示すように、45基~60基ならびに115基~135基の区間でフラクタル次元がピークとなるようなフラクタル次元分布が得られ、この2区間での断層破砕帯の存在が読み取れる。現場での切羽観察によるトンネル上半地質展開図(図7)からも、この2区間での地層の不連続からトンネルを横切る断層破砕帯の存在が確認されており、システムの解析結果と良く適合している⁴⁾。

【 凡 例 】

D_x, D_y, D_z ; x, y, z 方向でのフラクタル次元

D_{0x}, D_{0y}, D_{0z} ; フラクタル次元固有値

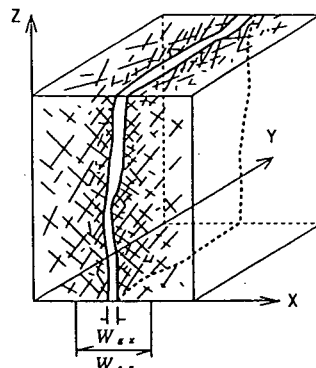
D_{gx}, D_{gy}, D_{gz} ; 断層ガウジのフラクタル次元

W_{gx}, W_{gy}, W_{gz} ; 断層ガウジ帯の幅

W_{sx}, W_{sy}, W_{sz} ; 断層破碎帯の幅

δ ; フラクタル次元変化率 (2)式で定義)

L ; 解析領域から断層破碎帯までの距離

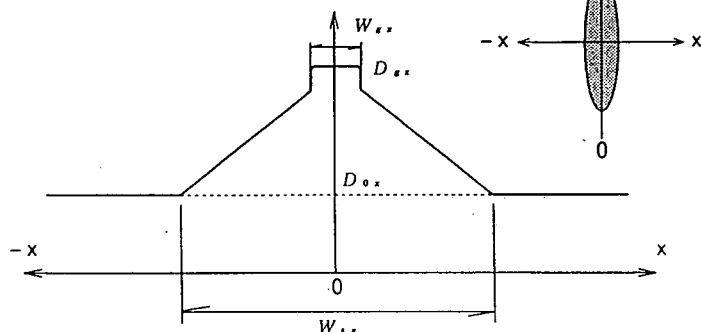


$$L < W_{gx} / 2 \text{ のとき } D_x = D_{gx}$$

$$W_{gx} / 2 \leq L \leq W_{sx} / 2 \text{ のとき}$$

$$D_x = \delta |(W_{sx} / 2 - L)| + D_{0x}$$

$$L > W_{sx} / 2 \text{ のとき } D_x = D_{0x}$$



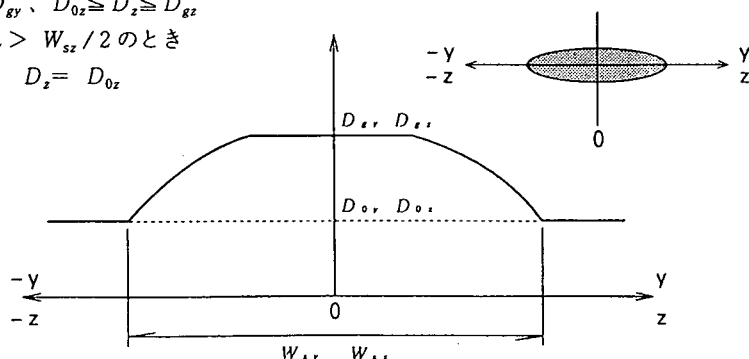
(a)断層に直交する方向のフラクタル次元変化

$$0 \leq L \leq W_{sy} / 2, 0 \leq L \leq W_{sz} / 2 \text{ のとき}$$

$$D_{0y} \leq D_y \leq D_{gy}, D_{0z} \leq D_z \leq D_{gz}$$

$$L > W_{sy} / 2, L > W_{sz} / 2 \text{ のとき}$$

$$D_y = D_{0y}, D_z = D_{0z}$$



(b)断層に平行な方向のフラクタル次元変化

図1 断層破碎帯のフラクタル構造モデル

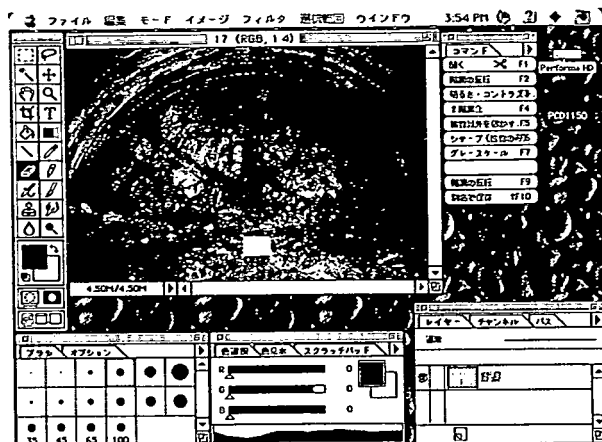


図2 画像処理前のトンネル切羽画像

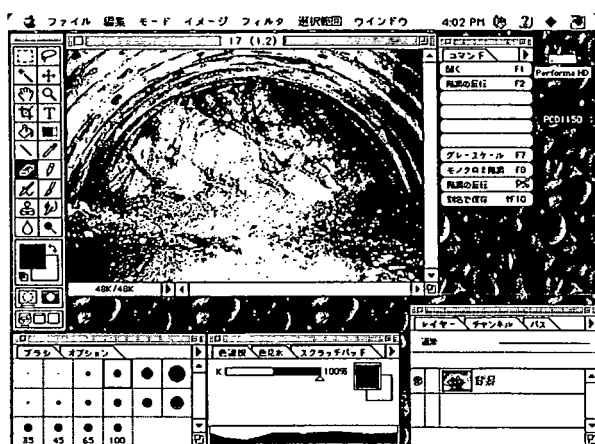


図3 画像処理後のトンネル切羽画像

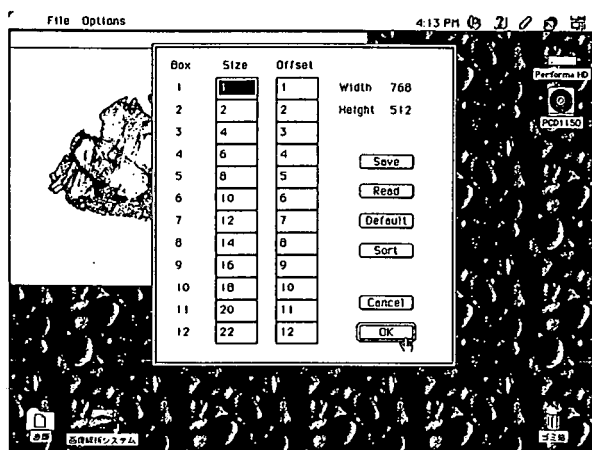


図4 トンネル切羽画像のフラクタル解析

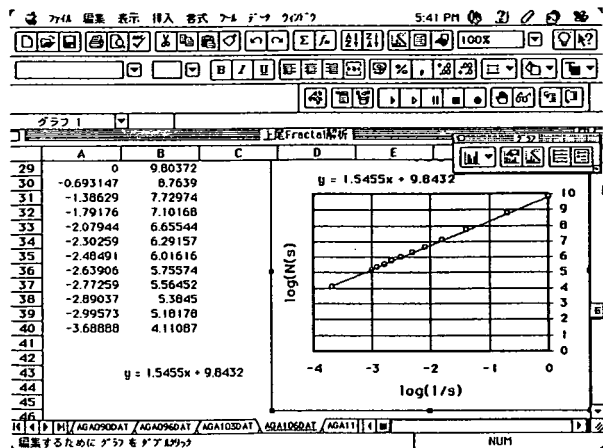


図5 トンネル切羽画像のフラクタル解析結果

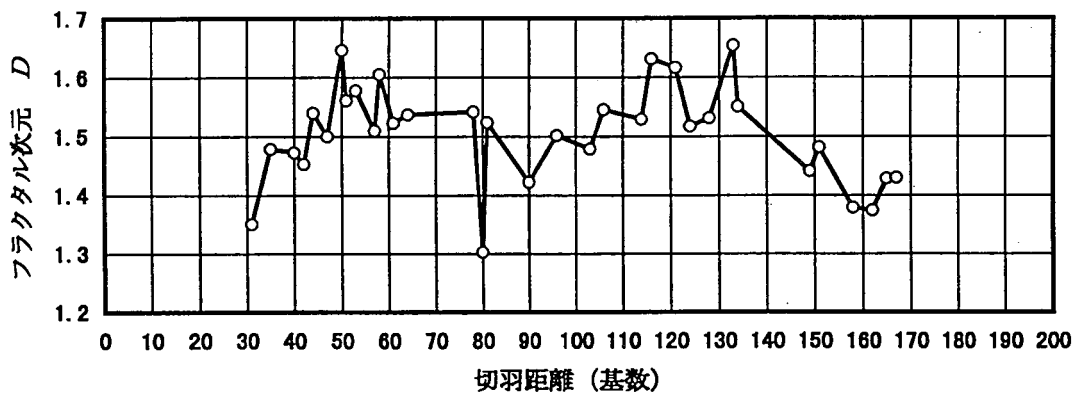


図6 切羽距離－フラクタル次元相関図

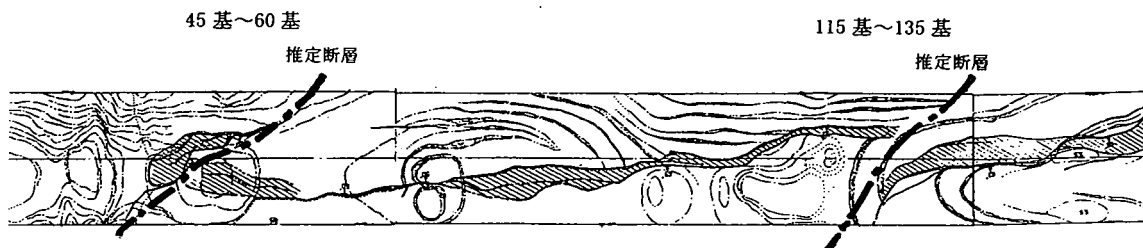


図7 トンネル上半地質展開図

4. おわりに

この報告で提示したトンネル切羽画像解析・前方地質予測システムの特徴は、物理探査手法のように地質変化を弾性波速度といった間接的手法で捉えるのではなくて、地質情報を数値化することにより地質変化を直接的に捉えていくことにある。また、日常の切羽観察の一環として実施でき、施工も停止することなく、デジタルスチールカメラを利用することによりリアルタイムに解析できる利点がある。さらに、内空変位などの計測データとの相関性を把握することにより、トンネルの安定性評価への応用が可能であると考えている。

【参考文献】

- 1) 宇田川義夫：トンネル切羽前方の地質予測方法、特許出願番号 PH9-156070 号
- 2) 宇田川義夫：断層破砕帯のフラクタル構造モデル、第 29 回土質工学研究発表会講演集、土質工学会、pp. 1235～1236、1994.
- 3) 宇田川義夫：フラクタル幾何学を応用した断層破砕帯評価に関する研究、千葉大学博士(理学)論文、178p. (フジタ技術研究所報増刊第 4 号)、1996.
- 4) 宇田川義夫、中村 稔、桃坂 繁、曾我部松男、都 昌平、岩田広己：トンネル切羽前方の地質予測手法ートンネル切羽画像解析システムー、第 52 回年次学術講演会講演概要集、土木学会、1997.