

(121) 断層破砕帯周辺の岩盤割れ目系にみられるフラクタル構造

藤 正 正会員 宇田川義夫

Fractal Structure in Rock Fracture Systems around Fault Sheared Zone

Yoshio UDAGAWA, FUJITA Corporation

Abstract

A fractured rock mass has a heterogeneity due to a development of discontinuous fractures such as joints, and both dynamic and hydrologic behavior of the rock mass are dominated by the characteristics of the discontinuous fractures. The appearances of the fault sheared zone with continuity in a construction site such as a dam, tunnel, slope excavation, causes some troubles oftenly.

It is possible to say that there are some relationships between the fault sheared zone and the distribution of discontinuous fractures because the fault sheared zone and the discontinuous fractures seem to have grown up under the uniform tectonic stress.

In this paper, the author investigated the fractal structure of rock fracture systems around the fault sheared zone based on an idea of "FRACTAL" and it is found that the closer fractal structure to the fault sheared zone has the bigger fractal dimension.

1. まえがき

亀裂性岩盤には節理に代表されるような不連続面が発達しており、その局所的な偏りにもとづく不均質性を有している。岩盤の力学的・水理学的挙動はこのような不連続面の分布に支配されており、岩盤不連続面の局所的な偏りにもとづく不均質性を定量的に評価することは、岩盤の工学的諸問題を解決するためには有効であると考えられる。

岩盤不連続面のなかでも、特に断層破砕帯は連続性のある破砕ゾーンを伴い、強度・変形特性や透水性が周辺岩盤と著しく異なるために、ダム・トンネル・斜面掘削等の土木建設工事においては、断層破砕帯はウィークポイントとなり施工上問題となることが多い。このため、事前調査の段階における断層破砕帯の予測や施工段階での断層破砕帯の評価は、施工の経済性・安全性に大きく影響を及ぼすものとなっている。

ここで、一定の造構応力場のもとで断層破砕帯とその周辺の岩盤割れ目系が形成されたと考えるならば、断層破砕帯とその周辺の岩盤割れ目系の分布との間には、なんらかの相関関係があるはずである。

本論文では、フラクタルの概念を導入し、断層破砕帯周辺における岩盤割れ目系のフラクタル構造(フラクタル次元の分布)について調査した結果、断層破砕帯に近づくにしたがってフラクタル次元が増大するという知見が得られた。さらに、その地質学的意味についても考察をおこなった。

2. 岩盤割れ目系のフラクタル次元

ある図形の任意の部分を拡大したときに、もとの図形と同形になっているような図形を「自己相似な

図形」という。たとえば、図1に示した曲線は「コッホ曲線」とよばれているが、この曲線の任意の部分を拡大すると、もとのコッホ曲線と同形となる。すなわち、コッホ曲線は自己相似な図形であるといえる。このような自己相似性を有する図形を「フラクタル」という。¹⁾

自然界には海岸線、河川の流路、山の起伏、雲の表面形状、樹木の枝などの複雑な形が数多く存在するが、これらはどれもフラクタルである。ただし、ここでいうフラクタルとはコッホ曲線のような完全な自己相似形ではなく、全体と部分がだいたい似たような図形となる「統計的自己相似性」を言っている。²⁾

岩盤の割れ目系もフラクタルとなっている。³⁾ 図2は新第三紀中新世・安山岩の岩盤割れ目系トレース (10m

×10m、100m²) であるが、岩盤割れ目系を一辺の長さ η の正方形格子網で覆ったときに、割れ目と交差する格子数を $N(\eta)$ とし、両対数紙上にプロットすると、これらは次式で示される相関関係にある。

$$N(\eta) \propto \eta^{-D} \quad (1)$$

ここで、 D は岩盤割れ目系のフラクタル次元であり、この直線の勾配の逆符号で与えられる。

すなわち(1)式を変形して、フラクタル次元 D は次式で求められる。

$$D = -\Delta \log N(\eta) / \Delta \log \eta \quad (2)$$

ここで、図2に示した岩盤割れ目

系のフラクタル次元は $D=1.394$ となる。⁴⁾⁵⁾ このように、対象物を格子網で覆ってフラクタル次元を求めていく方法をボックスカウンティング法といい、本研究ではこの方法を用いて検討をおこなった。

3. 断層破碎帯周辺の岩盤割れ目系にみられるフラクタル構造

3. 1 新第三系中新統・凝灰岩類の事例

図3・図4はそれぞれ、北陸地方のJダム地点の基礎掘削のり面でみられた、破碎幅2mと破碎幅1mの断層破碎帯の露頭である。岩盤是新第三系中新統の凝灰岩類であり岩盤等級はC_n級を示す。

フラクタル次元を求める対象領域は8m×8mの範囲とし、格子網間隔 η を1m、40cm、20cmの3通りで割れ目の交差する格子数 $N(\eta)$ をカウントした。対象領域は1mごとと水平に移動させて、フラクタル次元を求める作業を繰り返した。なお、破碎帯部分は割れ目の密集領域として考えた。

求められたフラクタル次元 D を、

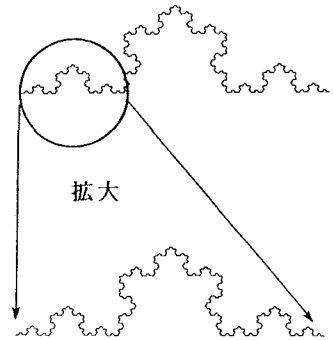


図1 コッホ曲線

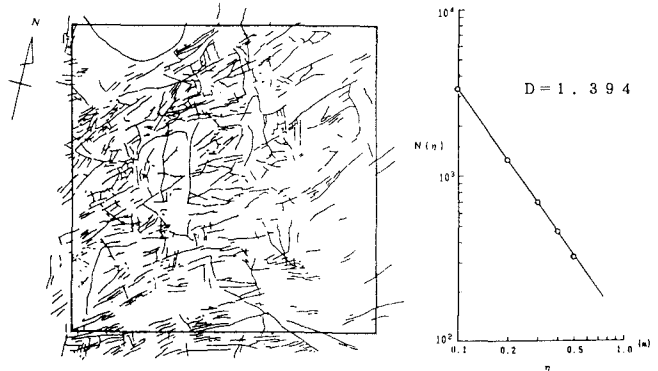


図2 岩盤割れ目系のフラクタル次元

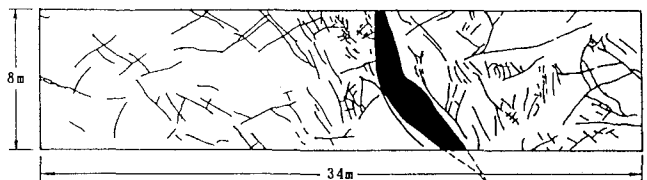


図3 断層破碎帯(破碎幅2m)周辺の割れ目系トレース

対象領域中心点から破碎帯までの距離 L を変数にしてプロットしたのが図5である。この図から、破碎帯に近づくにしたがってフラクタル次元 D が増大する傾向にあることがわかる。このフラクタル次元 D が増大する割合は、図5における回帰直線の勾配の絶対値で与えられ、この値を「フラクタル次元変化率 δ 」と定義すると、 δ は次式で与えられる。

$$\delta = |\Delta D / \Delta L| \quad (3)$$

図3・図4の、破碎幅2 mおよび破碎幅1 mの断層破碎帯のフラクタル次元変化率は、 $\delta = 0.049 \text{ m}^{-1}$ 、 $\delta = 0.082 \text{ m}^{-1}$ となる。⁶⁾⁷⁾

3. 2 白亜系・流紋岩の事例

写真1・図6は、兵庫県龍野市内の建設サイトでみられた、白亜紀後期・相生層群の凝灰岩類を貫く、流紋岩の貫入岩体の露頭である。貫入岩体と凝灰岩類との境界は、断層破碎帯(破碎幅約1 m)となっている。

流紋岩の貫入岩体は岩盤等級 C_H ~ C_H 級の堅硬な岩盤であるのに対して、周辺の凝灰岩類は、貫入の影響を受けて著しく擾乱されていることと地表からの風化作用によって脆弱になっており、岩盤等級は C_L ~ D 級を示している。

フラクタル次元の算定は、貫入岩体全体に1 m間隔のメッシュを切り、各メッシュの交点を中心とする3 m × 3 mの対象領域を設定した。さらにこの対象領域をボックスカウンティング法によってフラクタル次元を求めた。ボックスカウンティング法での格子網間隔 η は、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm、60 cmの5通りで、割れ目と交差する格子数 $N(\eta)$ をカウントした。

このようにして求めたフラクタル次元 D を、対象領域中心点から破碎帯までの距離 L を変数にしてプロットしたのが図7である。この図から明らかなように、断層破碎帯に近づくにしたがってフラクタル次元 D がほぼ直線的に増大する傾向が認められる。⁴⁾⁵⁾

(3)式によって求めた「フラクタル次元変化率 δ 」の範囲は、下限ラインで $\delta = 0.082 \text{ m}^{-1}$ 、上限ラインで $\delta = 0.068 \text{ m}^{-1}$ となり、下限ラインでの値 $\delta = 0.082 \text{ m}^{-1}$ は新第三系中新統・凝灰岩類の破碎幅1 m

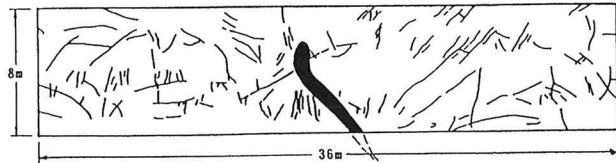


図4 断層破碎帯(破碎幅1 m)周辺の割れ目系トレース

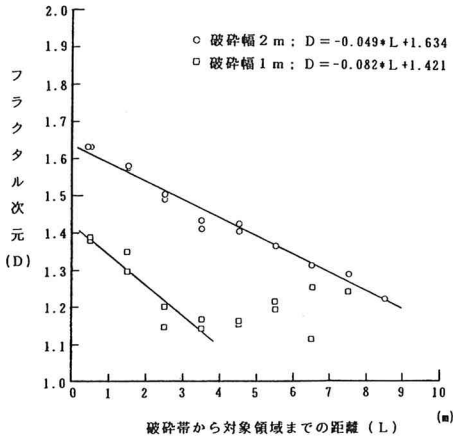


図5 断層破碎帯周辺のフラクタル次元 (新第三紀中新世・凝灰岩類)

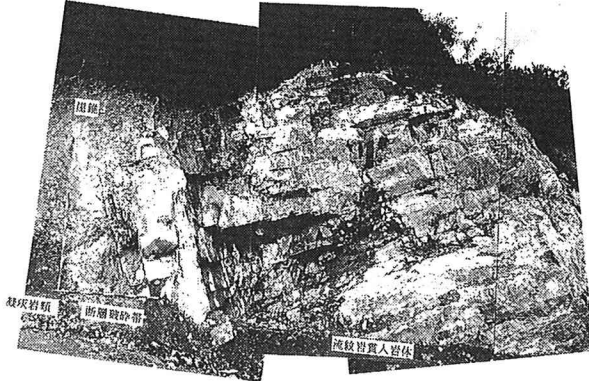


写真1 流紋岩貫入岩体(断層破碎帯)

での δ と同じ値となる。

4. 考察

地質年代および岩種が異なる地点において、断層破碎帯周辺での岩盤割れ目系のフラクタル次元が増大する傾向を示した。また、断層破碎帯に近づくにしたがいフラクタル次元 D が増大する割合を「フラクタル次元変化率 δ 」と定義し、破碎幅が同じであれば δ がほぼ同一である可能性を示唆した。これらのことは、断層運動に伴う断層破碎帯とその周辺の岩盤割れ目系の形成過程と密接な関連性があると考えられる。

すなわち、ある造構応力場のもとで断層破碎帯が形成されていく過程における、断層破碎帯近傍での造構応力の再配分過程（応力集中、歪、破壊現象）を反映しているのではないかと考えている。「フラクタル次元変化率 δ 」の値から、破碎幅1 mの破碎帯周辺においては造構応力の再配分がせまい範囲でおこなわれ、一方、破碎幅2 mの破碎帯周辺においては、造構応力の再配分が比較的広い範囲に分散され、結果として割れ目のフラクタル次元の増大傾向がより広い範囲で認められたものと考えられる。

以上のことを構造地質学的観点から考察する。断層の発達過程に関する研究は数多くなされてきているが、Tsuneishi et al. (1975)による光明断層の研究によれば、断層の発達過程は以下の4段階に分けられる。すなわち、第1段階は、将来断層が出現する地帯に地殻応力が加わり始め、地殻の歪が進行する段階である。第2段階は、一定の地帯の中でせん断破壊が発生し始め、その結果として小断層が次々に形成される。第3段階では、小断層が集中して発生する狭いゾーンが現れ始め、主断層の萌芽的な形成がおこなわれる。第4段階では、主断層に沿った間欠的変位と断層周辺の引きずり運動が主体となり、小断層の形成は事実上停止する。また、断層の引きずり運動により、第3段階で形成された小断層が断層近傍ほど大きく回転させられる。^{8) 9)}さらに、Moody and Hill (1956)によれば、主断層の形成に伴う2次、3次、4次…的な応力場によって、より小規模な2次、3次、4次…オーダーの小構造が形成されうとしている。^{10) 11)}

これらのことを考えあわせると、断層運動の成熟に伴って、造構応力は主断層近傍に集中するようになり、断層破碎帯の形成・成長とともに、その周辺岩盤には2次、3次、4次…の局所的な応力場によって複雑な岩盤割れ目系パターンが形成されていくことが想定される。このことが、断層破碎帯近傍において岩盤割れ目系のフラクタル次元が増大する要因となっているのではないかと考えている。

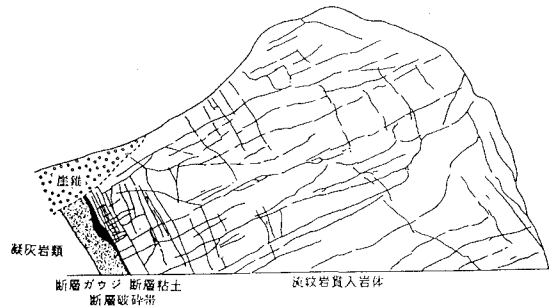


図6 岩盤割れ目系トレース図

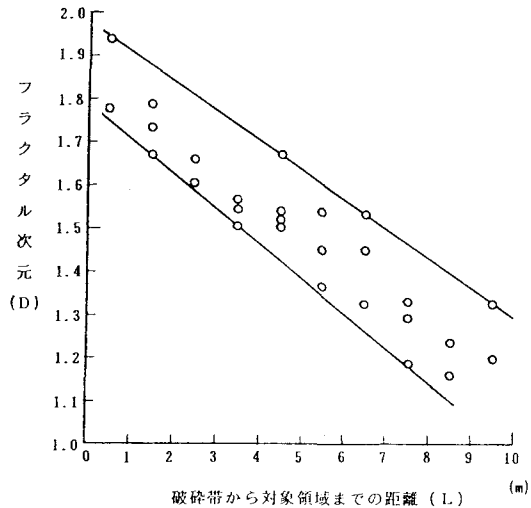


図7 断層破碎帯周辺のフラクタル次元
(白亜紀後期・流紋岩貫入岩体)

5. まとめ

本論文では、「フラクタル」の概念を導入し、断層破碎帯周辺における岩盤割れ目系のフラクタル構造(フラクタル次元の分布)に関して検討した。得られた結論を以下に示す。

①断層破碎帯周辺の岩盤割れ目系には、断層破碎帯に近づくにしたがってフラクタル次元が増大する傾向が認められた。また、断層破碎帯に近づくにしたがいフラクタル次元 D が増大する割合を「フラクタル次元変化率 δ 」と定義し、破碎幅が同じであれば δ がほぼ同一である可能性を示唆した。

②断層破碎帯周辺においてフラクタル次元が増大する傾向を示すことは、ある造構応力場のもとで断層破碎帯が形成されていく過程における、断層破碎帯近傍での造構応力の再配分過程(応力集中、歪、破壊現象)を反映しているのではないかと考えている。すなわち、断層運動の成熟に伴って、造構応力は主断層近傍に集中するようになり、断層破碎帯の形成・成長とともに、その周辺岩盤には2次、3次、4次…の局所的な応力場によって複雑な岩盤割れ目系パターンが形成されていくことが想定される。このことが、断層破碎帯近傍において岩盤割れ目系のフラクタル次元が増大する要因となっているのではないかと考えている。

今後、構造地質学的観点から断層運動の発達過程と岩盤割れ目系のフラクタル構造の成長現象を解明し、断層破碎帯の規模・分布性状と断層破碎帯周辺での岩盤割れ目系のフラクタル構造との関連性を明確にすることができれば、ダム、トンネル、斜面掘削等の建設工事における地質予測、岩盤評価に応用していくことができるものと考えている。

【参考文献】

- 1)Mandelbrot, B. B.; The fractal geometry of nature, Freeman and Co., 1982, (広中平祐監訳、フラクタル幾何学、日経サイエンス社)
- 2)高安秀樹; フラクタル、朝倉書店、1986
- 3)大西有三、鍵本広之; フラクタル幾何学の岩盤工学への適用についての基礎的検討、土木学会、第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp186~190、1986
- 4)宇田川義夫; フラクタルによる断層破碎帯の定量的表現に関する検討、日本応用地質学会、平成4年度研究発表会講演論文集、pp69~72、1992
- 5)宇田川義夫; 岩盤割れ目系のフラクタル特性による岩盤の不均質性評価に関する検討、ダム工学研究会、第3回ダム工学研究発表会講演集、pp25~27、1992
- 6)宇田川義夫; 破碎帯周辺における割れ目のフラクタル分布、土質工学会、第27回土質工学研究発表会講演集、pp1319~1320、1992
- 7)宇田川義夫; 断層破碎帯とその周辺の不連続面の分布に関する地質的考察、土質工学会、破碎帯の工学的性質に関するシンポジウム発表論文集、pp17~20、1992
- 8)Tsuneishi, Yoshida and Kimura; Fault-forming process of the Kōmyō fault in Central Japan, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 50, pp415~442, 1975
- 9)恒石幸正; 地質構造の科学(木村敏雄編) 4章 断層、朝倉書店、1984
- 10)Moody and Hill; Wrench-Fault tectonics, Bull. Geol. Soc. Am., 67, pp1207~1248, 1956
- 11)加藤碩一; 地震と活断層の科学、朝倉書店、1989