

(27) 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

清水建設 (株) 技術研究所 正員 ○若林 成樹
同上 福重 郁緒

An Experimental Study on a Relation Between Fractal Dimension and Shear Strength of Joint

Naruki WAKABAYASHI, SHIMIZU CORPORATION

Ikuo FUKUSHIGE, SHIMIZU CORPORATION

Abstract

An important factor of shear strength along a discontinuity is the roughness of the joint surface. The fractal dimension is proposed as a method of objectively quantifying the roughness profile. With this method determining the surface roughness can be quantified more statistically than other methods such as the widely-used joint roughness coefficient(JRC) proposed by Barton. Fractal dimensions were calculated from the examples of relation between JRC value and roughness profile. And direct shear tests for two types of rock joints(SANJYOME andesite, INADA granite) were performed. The JRC values estimated from the shear strength were compared with the values from the fractal dimension.

The following observations were obtained.

- ① Under the same joint length, the fractal dimension quantifies surface roughness and shear strength.
- ② Shear strength of interlocking joint is larger than Barton's equation and the effect of interlocking exaggerates the JRC value from roughness profile.

1. はじめに

岩盤には多数の亀裂、節理が含まれ、これらによって強度、変形特性が大きく異なってくる。このような岩盤を対象にした構造物の安定解析には亀裂、節理などの不連続面のせん断強度を把握しておく必要がある。不連続面のせん断強度に大きな影響を与える因子の一つに不連続面の表面粗さがある。この粗さを定量的に表現する代表的な指標にBartonのJRC値¹⁾(Joint Roughness Coefficient)があり、せん断強度と直結している。JRC値は実際の不連続面断面と粗さの断面図例とを比較して経験的に決定することができるが、主観的になり易い。そこで不連続面の断面形状から直接、粗さを定量的に表現できる指標が得られれば非常に有用である。

不連続面の粗さを定量的に表現する量にはJRC値をはじめ、粗さの勾配の自乗平均²⁾、正勾配の平均²⁾、パワースペクトルの傾き³⁾などがあるが、本報告では近年、注目を浴びているフラクタル次元をとりあげ、JRC値との関係を示した。また、人工的に作成した岩石不連続面のせん断試験を実施し、せん断強度から求められたJRC値とフラクタル次元から推定されたJRC値を比較検討した結果を述べる。

2. フラクタル次元の求め方

フラクタル次元Dfの求め方にはいくつかの方法があるが、ここではコンパス法を用いた。粗さの断面図の一端から半径rの半円で区切ってゆき、もう一端までに達するのに要する個数N(r)を求める。N(r)とrの間には、フラクタルな図形であれば以下の関係が成り立つ。

$$N(r) \propto r^{-Df} \qquad \text{---(1)}$$

従って、rを変化させてN(r)との関係を求め、両対数軸にプロットした傾きの絶対値がDfとなる⁴⁾。

この方法は理解しやすい反面、rが大きい場合、rとN(r)の関係は直線(Df=1)におけるものに等しいため、どのrから傾きが変わるのかわかりづらい。特にDfが1に近いときには注意が必要である。また、断面長が限られているときにはrに満たない残量の処理によっては結果に影響する危険性がある。

これらを解決するために以下のような改良を行った。

①傾きの変化を顕著にするために式(1)の両辺にrを乗ずる。

$$r \times N(r) \propto r^{1-Df} \qquad \text{---(2)}$$

②上式の左辺は断面を長さrの折れ線で近似した延長を表している。従って、rに満たない残量εrを左辺に加えて総延長を求め、次式を得る。これは式(1)で個数N(r)を端数まで拡張したことに相当する。

$$(r \times N(r) + \epsilon r) \propto r^{1-Df} \qquad \text{---(3)}$$

③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、得られた傾きの絶対値+1がDfとなる。

なお、不連続面の長さが異なる場合でも同様に処理ができるように、不連続面長で凹凸の高低を基準化した。すなわち、不連続面の長さは0から1で、凹凸の高低、および半径rは不連続面の長さに対する割合として考えた。

3. フラクタル次元とJRC値

図1⁵⁾、2⁵⁾に不連続面の長さが10、50、500cmのBartonのJRC値の断面図例を示す。各断面の粗さを長さ方向に300点読み取ってフラクタル次元Dfを求めた。例として図1のJRC値18～20の断面の半径rと総延長の関係を図3に示す。傾きがほぼ一定となる半径rが不連続面長に対して0.05～0.005の範囲でDfを求めた。この場合のDfは1.0179である。同様に求められたJRC値とDfの関係を図4に示す。

いずれの不連続面の長さにおいても、JRC値が増加する(粗くなる)につれDfは大きくなる。また、不連続面の長さが10cmと50cmの場合のJRC値とDfの関係はほぼ同様であるが、500cmの場

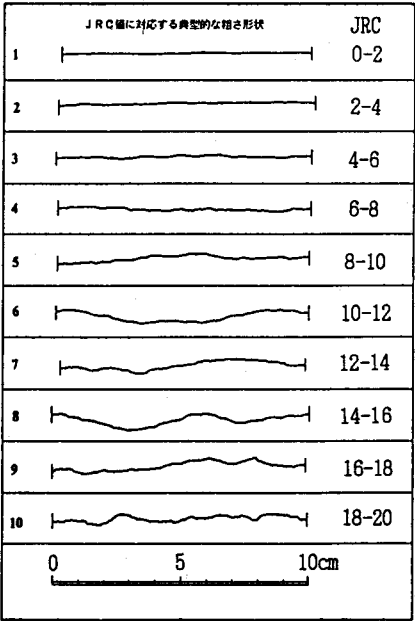


図1 BartonのJRC値と粗さの断面図例⁵⁾
(長さ10cm)

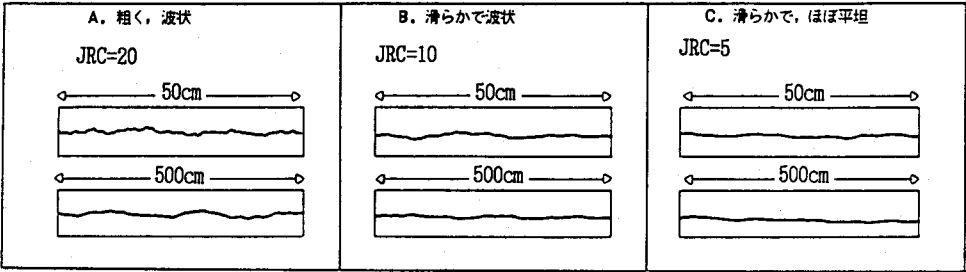


図2 BartonのJRC値と粗さの断面図例⁵⁾
(一部抜粋 長さ50、500cm)

合、同一のJRC値に対するDfは小さくなり、この傾向はJRC値が大きくなるにつれ顕著になる。

平滑な断面であればJRC値は0、Dfは1.0であることを考慮し、不連続面の長さが10cmのJRC値とDfとの関係を単調増加の次式で近似した。

$$JRC = \sqrt{(Df-1)/(4.413 \times 10^{-5})} \quad \text{---(4)}$$

この式で逆算するとJRC値が18~20の断面図に対するDfは、JRC値を19として1.0159となる。図1のJRC値とフラクタル次元Dfの関係はCarrら⁶⁾、Lee⁷⁾らもコンパス法で求めている。本報告と両者の近似式は異なるが、ともに単調増加の式である。両者のDfはJRC値が0のとき1.0、JRC値が18~20のときそれぞれ1.019、1.013であり、本報告で求められた値とほぼ等しい。

4. 人工的に作成した不連続面のフラクタル次元

三城目安山岩、稲田花崗岩のブロックを割裂して人工的な不連続面をそれぞれ8、6組づつ作成した。不連続面の大きさは長さ45cm、幅15cmである。この表面にA~Eまでの5本の測定ラインを設け、これらに沿って0.1cmおきに451点の粗さを測定した。2岩種の不連続面の測定例を図5、6に示す。表面の粗さは細かな部分では異なるが、全体的には各測定ラインとも同程度と思われる。また、各測定ラインのフラクタル次元Dfを表1にまとめて示す。

各不連続面の5本の測定ラインのDfの平均値は三城目安山岩の8組で1.0072~1.0093、稲田花崗岩の6組で1.0064~1.0080と狭い範囲に集中している。全体の平均的なDfはそれぞれ1.0085、1.0080となる。従って、三城目安山岩の8組、稲田花崗岩の6組の不連続面の粗さは同じであると

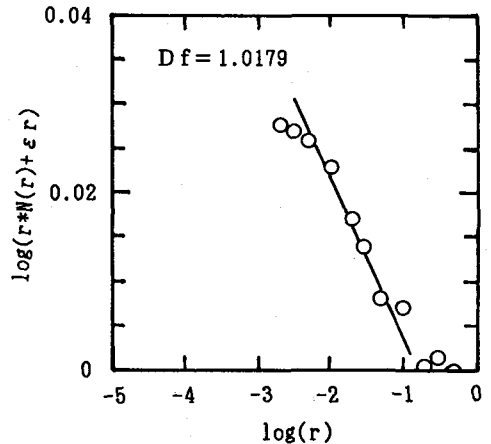


図3 半径rと総延長の関係 (JRC値18~20)

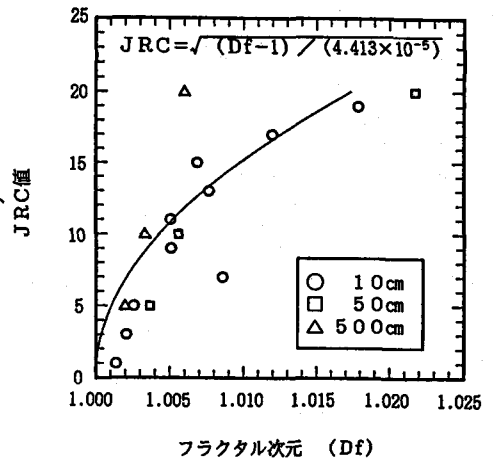


図4 フラクタル次元とJRC値の関係

表1 岩石不連続面の各測定ラインのフラクタル次元

試験体	A	B	C	D	E	平均	
三城目安山岩	AN03	1.0075	1.0090	1.0079	1.0092	1.0080	1.0085
	AN10	1.0147	1.0088	1.0079	1.0081	1.0072	
	AN04	1.0075	1.0090	1.0088	1.0090	1.0097	
	AN11	1.0084	1.0089	1.0099	1.0098	1.0096	
	AN05	1.0072	1.0073	1.0079	1.0064	1.0071	
	AN12	1.0063	1.0075	1.0093	1.0069	1.0096	
	AN07	1.0081	1.0089	1.0103	1.0095	1.0097	
	AN09	1.0063	1.0092	1.0077	1.0087	1.0082	
稲田花崗岩	GR03	1.0087	1.0069	1.0099	1.0092	1.0077	1.0080
	GR05	1.0094	1.0072	1.0079	1.0070	1.0063	
	GR04	1.0086	1.0085	1.0079	1.0071	1.0097	
	GR06	1.0082	1.0077	1.0087	1.0083	1.0123	
	GR07	1.0078	1.0075	1.0082	1.0078	1.0087	
	GR09	1.0061	1.0061	1.0064	1.0068	1.0064	

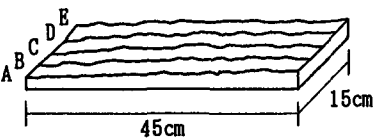


図5 不連続面の表面の粗さ (三城目安山岩 AN10)

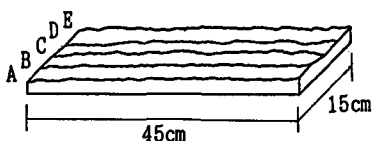


図6 不連続面の表面の粗さ (稲田花崗岩 GR06)

考えられる。式(4)の関係を適用すれば、JRC値は三城目安山岩で12.8~14.5、稲田花崗岩で12.0~14.3の範囲、平均値はそれぞれ13.9、13.5となる。

5. 不連続面のせん断強度

粗さが同じ2種類の岩石の不連続面で鉛直応力一定のせん断試験を行いせん断強度を求めた。試験は鉛直、せん断方向とも100tonの载荷能力を持つサーボコントロール式のせん断試験装置で行った。鉛直応力は三城目安山岩で一軸圧縮強度の0.002、0.01、0.05、0.1の4段階、稲田花崗岩では0.002、0.01、0.03の3段階で、せん断速度は2.25mm/minで各2個づつ試験を行った。試験体は約3ヶ月間室内放置したものを用いた。なお、不連続面上の鉛直応力が常に一定になるよう、せん断変位に応じて鉛直力を調整しながら試験を行った。また、一部の試験体においてせん断試験終了後、平滑な側面で基本摩擦角の測定を行った。

表2に2岩種の一軸圧縮強度と基本摩擦角を、表3にフラクタル次元Df、および一軸圧縮強度で基準化した鉛直応力とせん断強度の関係を示す。表3の同一鉛直応力下の各2個のせん断強度は、鉛直応力が大きくなると若干ばらつくがほぼ等しい。

表3の基準化された鉛直応力とせん断強度の関係を岩種ごとに図7、8に示す。両者とも鉛直応力にともないせん断強度も増加し、上に凸の非線形性を示している。BartonはJRC値を指標にした次のような鉛直応力とせん断強度の関係式を提案している¹⁾。

$\sigma_n/\sigma_c \leq 0.01: (\tau_f/\sigma_c) = (\sigma_n/\sigma_c) \tan 70^\circ$
 $\sigma_n/\sigma_c > 0.01: (\tau_f/\sigma_c) = (\sigma_n/\sigma_c) \tan \{JRC \log(\sigma_c/\sigma_n) + \phi_b\} \text{ --- (5)}$

表2 岩石の一軸圧縮強度と基本摩擦角

岩石名	一軸圧縮強度 (MPa)	基本摩擦角 (°)
三城目安山岩	74.5	36
稲田花崗岩	156.8	36

表3 不連続面のフラクタル次元とせん断強度

試験体		フラクタル次元	鉛直応力 一軸圧縮強度	せん断強度 一軸圧縮強度
三城目安山岩	AN03	1.0083	0.0026	0.0085
	AN10	1.0093	0.0027	0.0096
	AN04	1.0088	0.0106	0.0314
	AN11	1.0093	0.0106	0.0332
	AN05	1.0072	0.0499	0.0997
	AN12	1.0079	0.0500	0.0881
	AN07	1.0093	0.0993	0.1744
	AN09	1.0080	0.0976	0.1584
稲田花崗岩	GR03	1.0085	0.0023	0.0087
	GR05	1.0076	0.0022	0.0090
	GR04	1.0084	0.0102	0.0317
	GR06	1.0090	0.0102	0.0297
	GR07	1.0080	0.0299	0.0718
	GR09	1.0064	0.0300	0.0559

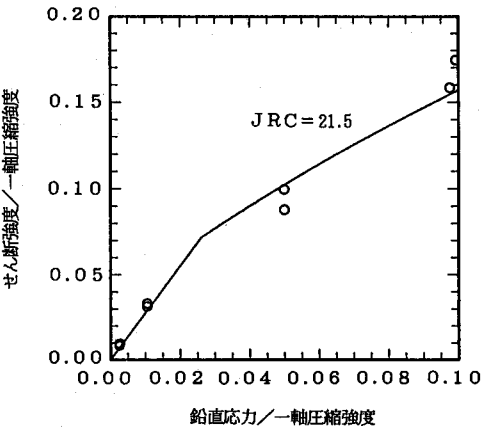


図7 三城目安山岩のせん断強度

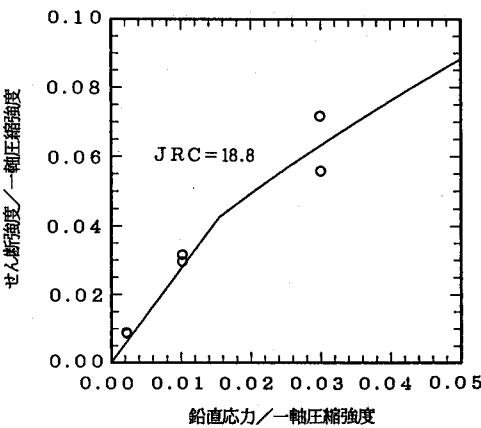


図8 稲田花崗岩のせん断強度

τ_p :せん断強度 σ_c :不連続面の一軸圧縮強度
 σ_n :鉛直応力 ϕ_b :基本摩擦角

表2の物性値を用いて上式を当てはめた結果を図中の実線で示す。この際、 σ_c は本来、不連続面表面の一軸圧縮強度であるが、表面の変質は無いと考へ、岩石の一軸圧縮強度を適用した。その結果、三城目安山岩ではJRC値を21.5、稲田花崗岩では18.8とおくことで鉛直応力とせん断強度の関係をほぼ表せることが得られた。また、2岩種のJRC値は20前後でほぼ等しく、非常に粗い不連続面と判断された。

6. 考察

三城目安山岩の不連続面のフラクタル次元Dfは1.0085、Dfから推定されるJRC値は13.9、一方、せん断強度にBarton式を適用して求められたJRC値は21.5である。同様に稲田花崗岩のDfは1.0080、JRC値はそれぞれ13.5、18.8である。2岩種の不連続面ともBarton式から求められたJRC値は、Dfから推定されたJRC値よりも明かに大きい。すなわち、実験で求められたせん断強度はBartonの式から推定される強度よりも大きい。これには次の理由が考えられる。

不連続面のせん断強度にはBartonが考慮している粗さ、一軸圧縮強度、基本摩擦角以外の因子も影響していると考えられる。割裂した不連続面は完全に噛み合っており、例えば、この噛み合わせの影響などでせん断強度はBarton式より大きくなった可能性がある。これらの影響は粗さから判断されるJRC値を見かけ上、大きくする。

7. まとめ

BartonのJRC値の断面図例と2岩種の不連続面のフラクタル次元の解析、およびせん断試験結果から次のことが得られた。

- ①不連続面の長さが同一であればフラクタル次元で定量的に不連続面の粗さ、せん断強度を評価できる。
- ②完全に噛み合った不連続面のせん断強度はBarton式から推定される強度よりも大きく、この噛み合わせの影響はJRC値を見かけ上、大きくする。

<参考文献>

- 1) Barton, N. : Review of a new shear-strength criterion for rock joints, Eng. Geol., Vol.7, pp.287~332, 1973.
- 2) 吉中ら : 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講演論文集, pp.386~390, 1987.
- 3) 畠ら : 岩盤不連続面の定量的評価と力学特性に関する基礎的研究, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要, Vol.III, pp.25-1~25-2, 1989.
- 4) たとえば高安秀樹, フラクタル, 朝倉書店, 1986.
- 5) 岩の力学連合会 : ISRM指針, Vol.3, 1985.
- 6) Carr, J.R. et al. : Rock mass classification using fractal dimension, 28th US Symp. Rock Mech., pp.73~80, 1987.
- 7) 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, pp.453~464, 1990.