

フラクタル解析によるトンネル覆工のひび割れに対する定量化の一考察 A consideration on quantification for tunnel lining cracks using Fractal analysis

須藤 敦史 (東北工大・工) 佐光 正和 (構研エンジ) 五十嵐 隆浩 (構研エンジ)

Atsushi SUTOH, Tohoku Institute of Technology
Masakazu SAKO, Koken Engineering Co., Ltd.,
Takahiro IGARASHI, Koken Engineering Co., Ltd.,
E-mail: ratsu-sutoh@tohotech.ac.jp

The theory of Fractals can quantify natural patterns that are statistically self-similar. And it is used for quantification of complex shapes. For those cracks, the result which can be called "Fractal" has come out. This study carried out quantification for cracks in the surface of cold region lining concrete of mountain tunnels in Hokkaido using Fractal analysis and presents basic data for quantitative evaluation of fractal characteristics, tunnel lining crack condition and degree of damage.

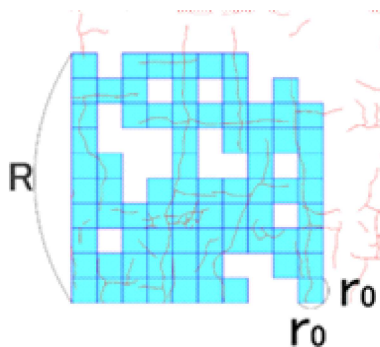


Fig. 1 Image of Box Counting method

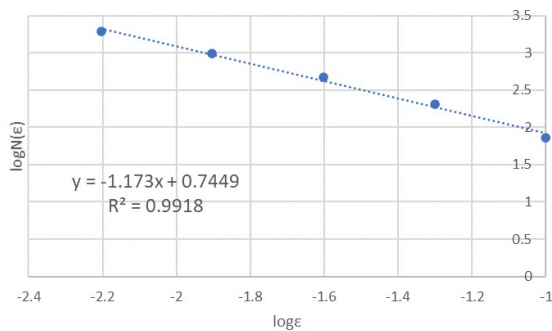


Fig.2 Fractal analysis of tunnel cracks (1)

1. はじめに

山岳トンネルにおける定期点検は、覆工コンクリート表面における①ひび割れ、②浮き・剥離、③漏水、④目地ズレ・開き、⑤豆板・空洞、⑥遊離石灰の6種類の項目を基本としており、これらの点検結果を基にして山岳トンネルの劣化評価や判定区分を定めている。

しかし、覆工コンクリートの表面におけるひび割れの評価は、ひび割れの数、幅や形状・形態など主に定性的になされているが、ひび割れの形状・形態における進展やそれらの分布遷移などは定量的に評価が成られておらず、定性的な評価や判定をせざるを得ないのが現状である。

そこで本研究では、北海道(寒冷地)における山岳トンネルの覆工コンクリート表面のひび割れに対してフラクタル解析²⁾を実施して、そのフラクタルの特性を求めてひび

割れ状態や損傷程度に対する定量評価の基礎資料を検討・整理したものである。

2. Box Counting 法 とフラクタル特性

フラクタル次元を求めるには幾つかの方法が提案されているが、岩盤やコンクリート構造物における表面のひび割れのフラクタル解析では、Fig.1に示す被覆法のうちの Box Counting 法^{3),4)}が用いられることが多い。

この方法は、対象範囲 R の正方形ひびわれパターンを一辺の長さ r_0 の正方形格子に分割し、ひびわれを含む一辺の長さ r_0 の正方形の個数 N を求めるものである。

ここで、分割数(ϵ)を変えたとき N と ϵ の関係は式(1)のように表される(本解析では $\epsilon = 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 \dots$)。

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

また、フラクタル次元(D値)は以下のように求められる。

$$D = \frac{\log N}{\log \epsilon} \quad (2)$$

実際には、それぞれの N と ϵ を両対数上にプロットして、その勾配からフラクタル次元²⁾が求められる。

ここでフラクタル次元は、覆工コンクリート表面のひび割れにおいては、おおよそ $1 \leq D \leq 2$ の値を示している。

これは単純な線では1次元($D=1$)、また面では2次元($D \leq 2$)以下のフラクタル次元(D値)となるため、複雑な覆工コンクリート表面のひび割れは平面に近いフラクタル次元が得られると予想される。

3. トンネル覆工ひび割れにおけるフラクタル解析

本研究で対象とした山岳トンネルは、北海道(札幌地区)の8トンネルにおいて定期点検時の覆工コンクリート表面に対する観察(CAD)データを使用しており、それぞれのひび割れの本数や形態から粗な箇所と密な箇所を選定して、フラクタル解析におけるD値およびその回帰直線の傾きと切片を求めている。

(1) ひび割れ形状におけるフラクタル解析

まず、上記の札幌地区の8トンネルにおいて比較的密な覆工コンクリートひび割れ形状とフラクタル次元(D値)との関係をFig.2に示す。

Fig.2より、フラクタル次元(回帰曲線の勾配: $D=1.173$)、および相関係数 R^2 も 0.9918 と高い相関を示している。

したがって、山岳トンネル覆工コンクリートにおいて密なひび割れ形状に対するフラクタル次元を求めることは可能である。

(2) ひび割れの状態とフラクタル解析の範囲

Table.1 Fractal analysis for 8 tunnel cracks in Sapporo ares

No.	The crack density				
	Roughness		Tunnel	Dense	
	a	b		a	b
①	1.1125	0.6684	S-tunnel	1.2425	0.6670
	1.1252	0.8009		1.2393	0.6664
	1.0847	0.7024		1.2207	0.8235
②	0.9808	0.4813	T-tunnel	1.0461	0.8551
	1.0462	0.7458		1.1106	0.8156
	1.0009	0.4561		-	-
③	-	-	J-tunnel	1.2117	0.3958
				1.1674	0.5837
				1.1534	0.6132
				1.1183	0.5961
④	1.0896	0.5596	N-tunnel	1.1730	0.7449
	1.1115	0.6060		1.1928	0.7921
	1.0656	0.7227		1.2334	0.7540
	-	-		1.1477	0.7908
⑤	1.0557	0.1246	S-tunnel	1.0414	0.4824
⑥	-	-	U-tunnel	1.1979	0.6614
⑦	1.0567	0.7291	K-tunnel		
	1.0667	0.7304			
⑧	1.0373	0.2629	N-tunnel	1.2235	0.8255
	1.0718	0.3806		1.1347	0.8023
	1.0647	0.5693	Average	1.1679	0.6982

次に、札幌地区の8トンネルにおける覆工コンクリート表面に対して、同様に Box Counting 法を適用してフラクタル次元 (D 値) 求め、回帰直線 ($y=ax+b$) の傾き(a)と(b)値を示したものを Table.1 に示す. ここで札幌地区の8トンネルに対するフラクタル解析の回帰直線の平均値は非常に良い相関特性 ($R^2=0.9952$) を示しており、フラクタル解析はトンネル覆工コンクリート表面におけるひび割れ評価の定量化に対する指標となり得ると考えられる。

またフラクタル解析におけるひび割れ状態の定量化を検討するために札幌地区における8つのトンネル覆工における回帰直線の傾き:Slope(a)と切片:Section(b)を Fig. 3 に示す.

Fig.3 の傾き (a)に示すように覆工コンクリート表面のひび割れが密:Dense な場合には、粗 Raughness の場合の値より大きなフラクタル次元 (D 値) を示している。

また Fig.3 の切片(b)においても、同様に覆工コンクリート表面のひび割れにおいても密な場合には、粗の場合の値より大きなフラクタル次元 (D 値) を示している。

したがって、トンネル覆工コンクリートの表面のひび割れが密な場合にはフラクタル解析において回帰直線の傾き(a)と切片(b)ともに大きな値を示している。

4. ひび割れ性状の定量化に対する準備

最後に、旧サロマトンネル:Old S-tunnel (北見地区) では覆工コンクリート表面におけるひび割れ性状に対して常時微動観測を実施している。そこでトンネル覆工のひび割れ性状のフラクタル解析と常時微動の観測値との比較を行うために、求めた回帰直線の傾き(a)と切片(b)を Table.2, Fig.3 に示す.

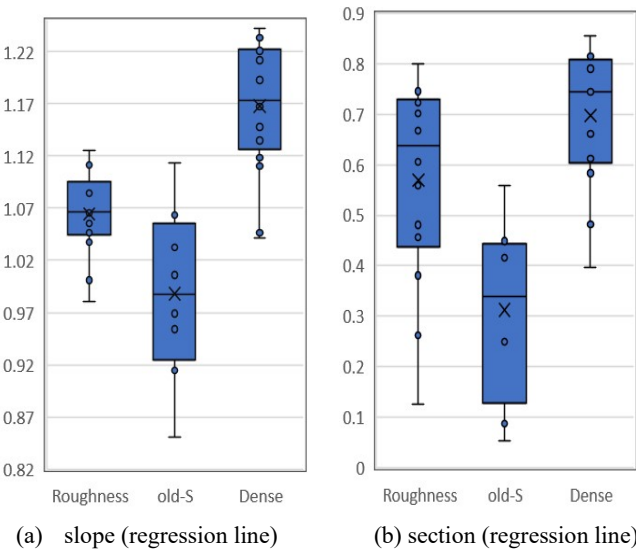


Fig. 3 Fractal analysis for tunnel cracks with old tunnel
Table.2, Fig.3 より、傾きおよび切片において概ね粗の範囲よりも下に分布しているため、旧サロマトンネルの覆工コンクリート表面のひび割れは、本数や形態から粗である。

Table.2 Fractal analysis for old S-tunnel cracks

Old S-tunnel		
No.	a	b
①	1.0633	0.5584
②	0.9540	0.4259
③	1.1131	0.2487
④	1.0324	0.0540
⑤	0.9145	0.0866
⑥	0.8505	0.2620
⑦	0.9690	0.4491
⑧	1.0061	0.4152
Average	0.9879	0.3125

5. 結論

本研究は、寒冷地の山岳トンネルにおける覆工コンクリート表面のひび割れに対してフラクタル解析を実施した結果、以下の結論が得られた。

- 1) フラクタル次元 (回帰曲線の傾きと切片) は、トンネル覆工におけるひび割れの状態 (粗・密) を定量的に評価する事が可能である。
- 2) 覆工コンクリート表面のひび割れが密な場合に対して、フラクタル次元 (回帰曲線の傾きと切片) は大きな値を示す。
- 3) 今後も数多くのトンネル覆工のひび割れの本数やその形態のフラクタル解析を積み重ねて定量化を進める必要がある。

参考文献

1) 須藤敦史,佐藤京,兼清泰明,丸山収,西弘明：寒冷地の道路構造物（橋梁・山岳トンネル）における劣化特性とその分布について,土木学会構造工学論文集, Vol.62A, pp.156-165, 2016.

2) 阿部忠行,小川 進:舗装ひびわれのフラクタル解析,土木学会論文集, No.442/V-16, pp.119-126,1992.2.

3) 松下貢:フラクタルの物理,裳華房,2002.

4) 土屋範芳,松川陽介,中塚勝人:岩石断面の割れ目の分布と計上のフラクタル解析,日本地熱学会誌,第 16 巻,第 2 号, pp.153-171, 1994.