

山岳トンネルの覆工表面におけるひび割れの定量化に対する検討（シンポジウム講演概要）

Quantification of cracks in the lining surface of mountain tunnels

(Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

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

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

This study applied some analysis method to quantify the crack properties of tunnel lining concrete due to deterioration from cold region environmental and aging conditions. Condition of analysis, characteristic value and appearance of tunnel lining cracks were discussed. Space filling of deterioration fracture patterns in sections of the tunnel lining concrete shows a statistical self-similarity, and its fractal dimension determined by a box-counting algorithm lied in the range from 0.95 to 1.25. And also, the other analysis was performed in dense and coarse conditions of tunnel lining concrete cracks from cold region.

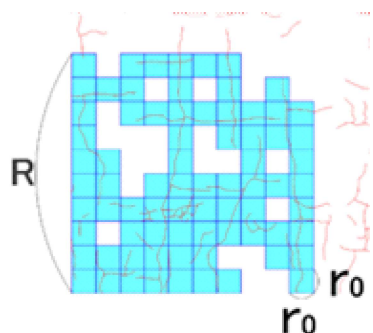


Fig. 1 Image of Box Counting method

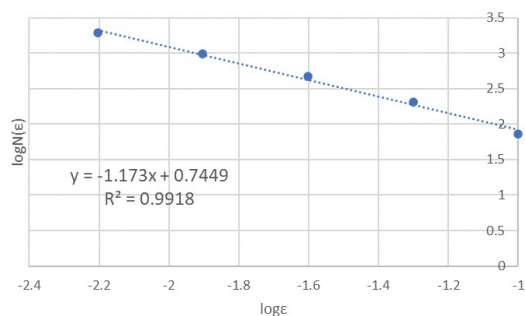


Fig.2 Fractal analysis of tunnel cracks

1. はじめに

山岳トンネルの定期点検は、覆工表面に対する近接目視から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種類を基本項目としており、これらの点検結果から山岳トンネルの劣化評価や判定区分を求めているが、その影響は表面のひび割れが圧倒的に大きい。さらに、表面ひび割れの評価は、ひび割れの数、幅や形状・形態など主に定性的な評価が多く、加えてひび割れの形状・形態やそれらの分布の遷移や進展などに対して定量的な評価が成られておらず、定性的な評価・判定をせざるを得ないのが現状である¹⁾。

著者らは、北海道（寒冷地）における山岳トンネルの覆工表面のひび割れに対してフラクタル解析²⁾を実施しているが、得られる特性値のひび割れ状態や損傷程度に対する評価指標が定量的な評価には至っていない³⁾。そこで本研

究では、形状因子・ひび割れ率・ひび割れ度により、トンネル覆工表面のひび割れに対する定量化の基礎検討を行った。

2. フラクタル・形状因子・ひび割れ率・ひび割れ度

フラクタル次元は、Fig.1 に示す被覆法のうちの Box Counting 法⁴⁾⁵⁾が用いている。この方法は、対象範囲 R の正方形ひびわれパターンを一边の長さ r_0 の正方形格子に分割し、ひびわれを含む一边の長さ r_0 の正方形の個数 N を求めるもので分割数 (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 $\epsilon = 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 \dots$ ）。

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

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。

また、ひび割れの分岐発達の状態は、形状因子 Φ で評価され、次式で求められる。

$$R = \Phi \sqrt{A} (\Phi \geq 1) \quad (r_0 = R \text{ のとき } N = 1) \quad (3)$$

ここで Φ は形状因子であり、 A はひび割れを含む正方形格子の総面積で $A = Nr_0$ より求める。また R は Fig.1 における最大直線距離である。

また、ひび割れのトンネル覆工表面における被覆程度は、次式に示すひび割れ率 $C.R.$ (Crack Ratio) で評価される。ここで A_0 は調査対象面積である。

$$C.R.(r_0) = A/A_0 \quad (4)$$

さらにトンネル覆工表面の単位面積におけるひび割れの総延長は、次式で示すひび割れ度 $C.D.$ (Crack Density) で評価される。

$$C.D.(r_0) = L/A_0 \quad (5)$$

ここで L はひび割れの総延長で $L = Nr_0$ より求める。

以上より、フラクタル次元はひび割れの状態特徴、ひび割れ度は単位面積当たりのひび割れの総延長、ひび割れ率はひび割れの被覆程度、形状因子はひび割れの分岐発達状態を示す特性値である。

Table.1 Quantification of Tunnel cracks

Shape factor (S.F.)			Crack Ratio (C.R.)			Crack Density (C.D.)		
center	name	portals	center	name	portals	center	name	portals
6.1222	NO	5.4560	0.0267	NO	0.0336	0.3531	NO	0.4220
4.5677	KA	5.8346	0.0479	KA	0.0294	0.6369	KA	0.3839
6.0259	SY	5.5772	0.0275	SY	0.0321	0.3595	SY	0.4224
6.7733	MI	4.6227	0.0218	MI	0.0468	0.2893	MI	0.6257
	HR	4.1689		HR	0.0575		HR	0.7888
		3.6159			0.0765			0.5206
6.1044	CY	3.4482	0.0268	CY	0.0841	0.3909	CY	1.0780
5.0800		2.7256	0.0388		0.1346	0.5065		1.8167
4.6401	OR	3.6279	0.0464	OR	0.0760	0.6003	OR	0.6003
3.3664		3.3567	0.0882		0.0888	1.1437		1.1518
	SN	2.9655		SN	0.1137		SN	1.4707
2.9655		3.6401	0.1137		0.0755	1.2004		0.9665
3.1217	NB	3.6629	0.1026	NB	0.0745	1.3490	NB	0.9337
3.6911	NK	2.9324	0.0734	NK	0.1163	0.9442	NK	1.5694
4.7223	KI	4.7534	0.0448	KI	0.0443	0.6113	KI	0.5679
	UB	3.7744		UB	0.0702		UB	0.8811
4.8176		7.6104	0.0431		0.0173	0.5728		0.2225
7.5092	YS		0.0177	TS		0.2599	YS	
3.9838			0.0630			0.8438		
3.9838	JK		0.0509	JK		0.6798	JK	
4.8422	Mean	4.2219	0.0521	Mean	0.0689	0.6713	Mean	0.8484

3. 覆工表面のひび割れに対する定量化

本研究で対象とした山岳トンネルは、北海道(札幌地区)の14トンネルにおいて定期点検時の覆工表面に対する観察(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、それぞれの解析値を求めている。

(1) 覆工ひび割れにおけるフラクタル解析

まず、札幌地区のトンネルにおいて比較的密な覆工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(回帰直線の勾配: $D=1.173$)、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、トンネル覆工表面のひび割れ形状に対するフラクタル次元による定量化は可能である。

(2) 形状因子・ひび割れ率・ひび割れ度

次に、同様に札幌地区のトンネルにおける坑口部と中央部の覆工表面に対して、形状因子とひび割れ率およびひび割れ度を求めた結果をTable.1(a),(b),(c)に示す。

Table.1(a),(b),(c)よりトンネル覆工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。またトンネル中央部と両坑口では、両坑口における覆工のひび割れが多い(損傷が大きい)を示唆している。

さらに、求めた各特性値を比較した結果をFig.3(a),(b),(c)に示す。Fig.3(a),(b),(c)より、札幌地区におけるトンネル覆工ひび割れのフラクタル次元は、ひび割れ率・ひび割れ率に伴って大きくなり、また形状因子はひび割れの発達に伴って小さくなっており、高い相関を示している。同様にトンネル中央部に比べて両坑口部のひび割れにおける損傷度は大きくなり、トンネル覆工表面における健全性の判断する値に使用が可能である。

4. 結論

本研究は、寒冷地の山岳トンネルにおける覆工表面のひび割れに対してフラクタル解析および形状因子・ひび割れ率・ひび割れ度の解析結果、以下の結論が得られた。

- 1) フラクタル次元(回帰直線の傾き)は、トンネル覆工のひび割れに対して状態(粗・密)を定量的に評価が可能であり、形状因子・ひび割れ率・ひび割れ度においても同様の結論が得られた。

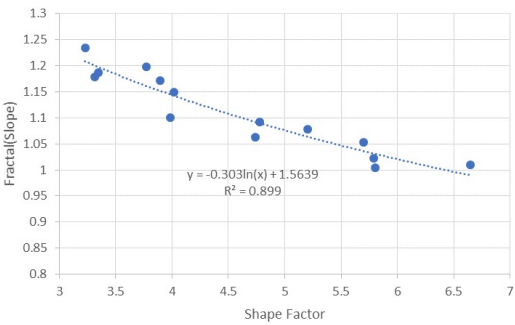


Fig.3(a) Relationship between Fractals and Shape factor

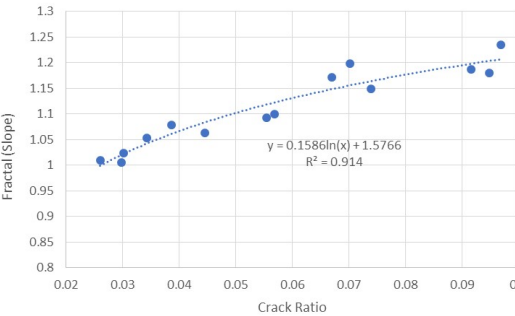


Fig.3(b) Relationship between Fractals and Crack Ratio

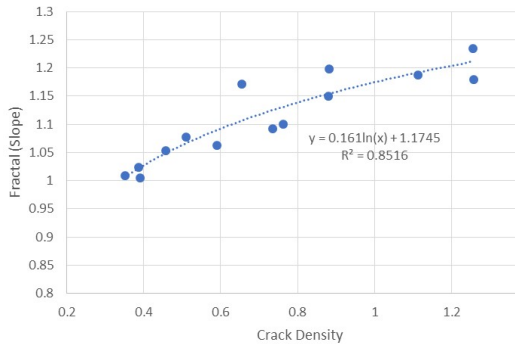


Fig.3(c) Relationship between Fractals and Crack Density

- 2) しかし、トンネル覆工の表面ひび割れにおける劣化評価値には至っておらず、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解析により、定量化およびその評価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) 須藤敦史,佐光正和,五十嵐隆浩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:土木学会,第25回応用力学シンポジウム論文集,S01A-01,2022.5.
- 4) 松下貢:フラクタルの物理,裳華房,2002.
- 5) 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.