

老朽化トンネルにおける覆工表面ひび割れ 分布の評価

宇都宮隆¹・米田裕樹²・草場雅哉³・呉 学震⁴・野口捺菜⁵・蔣 宇静⁶

¹正会員 協同エンジニアリング株式会社(〒870-0876 大分県大分市三芳1238-1)
E-mail: utsunomiya@kyodo-cec.co.jp

²正会員 協同エンジニアリング株式会社(〒870-0876 大分県大分市三芳1238-1)
E-mail: yoneda@kyodo-cec.co.jp

³学生会員 長崎大学大学院工学研究科(〒852-8521 長崎市文教町1-14)
E-mail: bb52117503@ms.nagasaki-u.ac.jp

⁴学生会員 長崎大学大学院工学研究科(〒852-8521 長崎市文教町1-14)
E-mail: 503211360@qq.com

⁵学生会員 長崎大学工学部工学科(〒852-8521 長崎市文教町1-14)
E-mail: bb35514025@ms.nagasaki-u.ac.jp

⁶フェロー 長崎大学大学院工学研究科(〒852-8521 長崎市文教町1-14)
E-mail: jiang@nagasaki-u.ac.jp

大分県のトンネルの数は都道府県別では全国1位となっており, その大半は, 供用年数が30年以上のものである. 本報告では, 老朽化トンネルにおける覆工の健全度評価技術の現状と課題を述べるとともに, 大分県内の実トンネルの坑内調査と振動計測に基づいた覆工の表面ひび割れの分布や振動特性について考察を行い, 構造物としての覆工の振動特性(健全度)と覆工表面ひび割れの密度, 背面空洞の有無との相関を詳細に分析した. これにより, トンネル覆工の振動特性の異常箇所を特定することで, トンネル内部の詳細な調査の重要性を指摘するとともに, トンネルの維持管理において求められる計測技術について考察を加えた.

Key Words : aged tunnel, health assessment, crack density, voids, vibration properties

1. 研究の背景と目的

大分県のトンネルの数は562本(2013年4月1日現在: 大分県庁ホームページ)あり, 都道府県別では全国1位となっている. その大半は, 供用年数が30年以上のものであり, 覆工コンクリートの劣化進行に伴い, 健全度の的確な判断と対策が余儀なく必要とされている.

本報告では, トンネルの健全度評価手法の現状と課題を述べるとともに, 大分県内の実トンネルの坑内調査と計測に基づいた覆工コンクリートの表面ひび割れの分布や振動特性に着目した健全度の推定を行うことを目的として, 構造物としての覆工コンク

リートの振動特性(健全度)と覆工の表面ひび割れの密度, 背面空洞の有無との相関について明らかにすることを試みる.

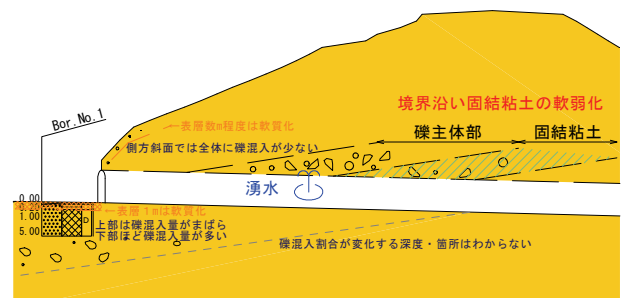


図-1 終点側坑口トンネル地質縦断面図(イメージ)
(礫主体部と固結粘土部)

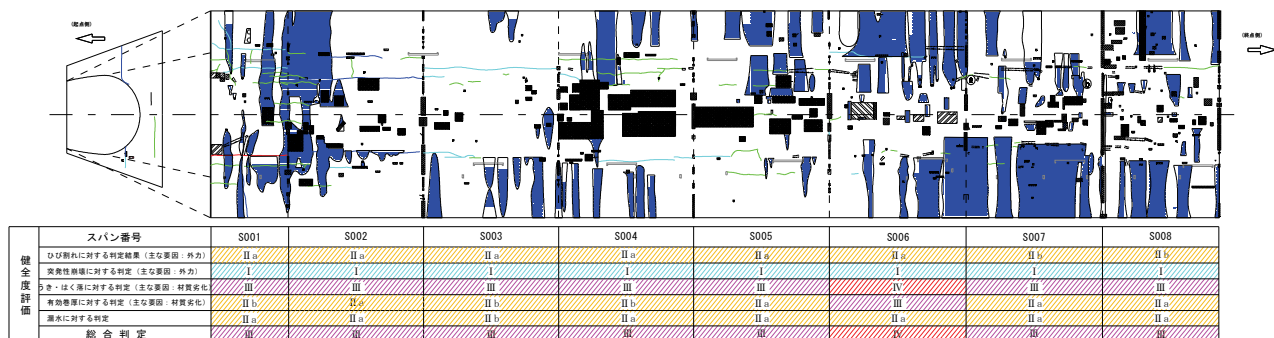


図-2 トンネル変状展開図 (S001～S008)

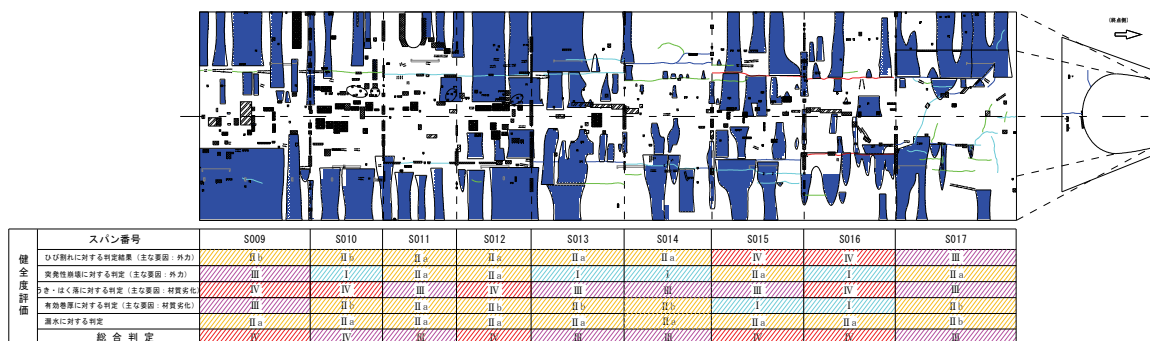


図-3 トンネル変状展開図 (S009～S017)

2. 対象トンネルの概要

対象トンネルは、昭和29年に施工された幅員4.1m、高さ4.9mの一車線トンネルで、トンネル自体は、供用後60年経過しており、トンネル内は覆工の表面ひび割れや漏水、うき・はく離などの損傷が多く見られる。図-1には、終点側坑口部の地質縦断図のイメージ図を示す。トンネルの周辺地山は風化ローム質の低固結粘土層（粘土砂礫混在）であり、一軸圧縮強度は0.3～0.6N/mm²、静弾性係数は220～420MN/m²と推測されている。地山の自立性は悪く、地山強度比が1.7～2.0であることから、地山等級DⅡ～E程度と思われる。

このような状況から本トンネルは通行に支障が出るほど覆工コンクリートの劣化損傷は進んでいるおり、トンネルの点検では健全度評価Ⅳと判定されている^り。

図-2～3には覆工表面のクラック展開図を、図-4～5に覆工背面空洞の調査結果を示す。

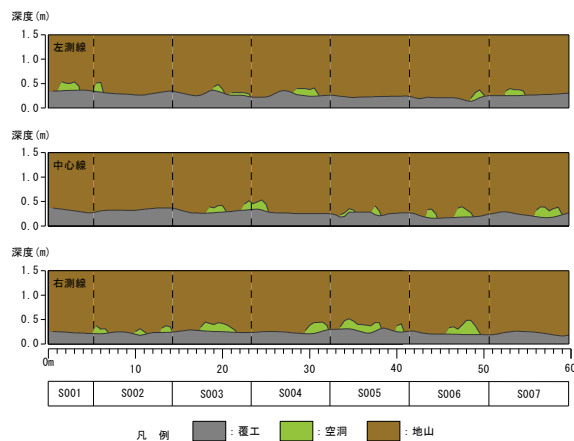


図-4 空洞調査結果 (S001～S007)

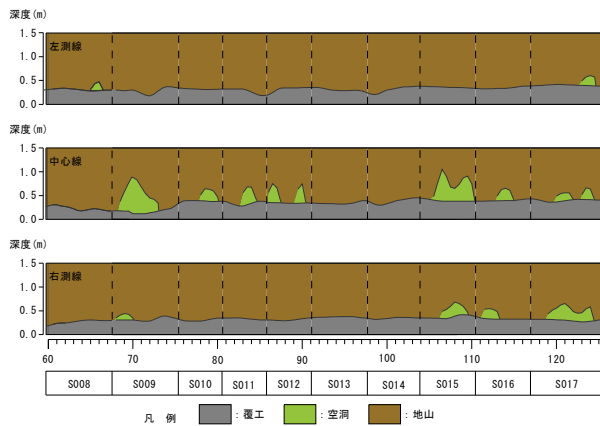


図-5 空洞調査結果 (S008～S017)

図-2～5 からは次の事項が考察されている。

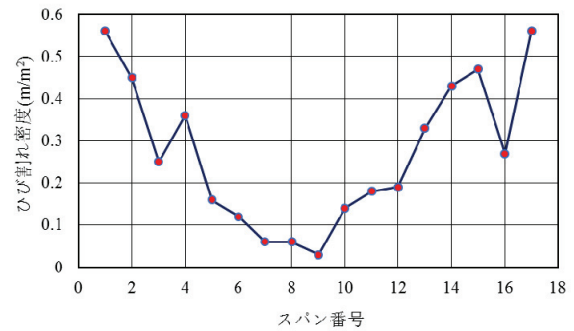
- ひび割れはS001, S015, S016のアーチ部に幅3.0mm以上の縦断方向のひび割れ及びS003, S004, S010～S016でスパンを縦断するひび割れが確認された。
- S001～S004, S013～S017はひびわれが密集しており、(0.3mm以上のひびわれ総延長) / (覆工アーチ部の投影面積) で表すひび割れ密度が20cm/m²を超える。
- ひび割れの健全度はS015, S016がⅣ判定でスパンS017はⅢ判定である。
- うき・はく離の健全度はS009, S010, S012, S016がⅣ判定であり、それ以外はⅢ判定である。
- 空洞箇所は右側, 中心, 左側で違い、右側よりも左側の方は空洞が大きい。

3. 覆工コンクリート表面ひび割れ分布の分析

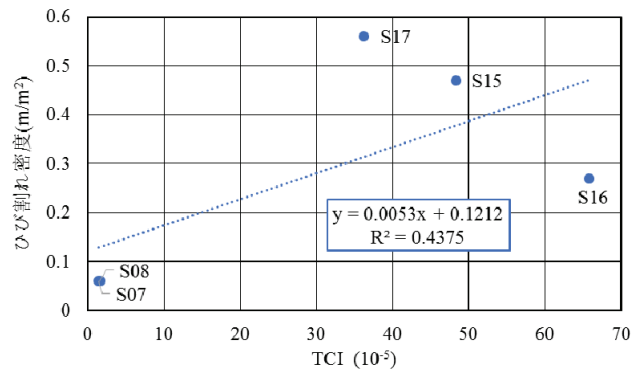
覆工コンクリートに発生したひび割れの定量的評価手法に着目して、(1) ひび割れ密度による評価、(2) TCI (ひび割れ指数) による評価、(3) デジタル画像処理を利用したひび割れ抽出によるフラクタル次元評価⁴⁾を比較検討し、点検技術者の技術力に依存しない合理的、客観的な評価手法への実用性に加担することが考えられる。

スパンごとのひび割れ密度を図-6(a)に示す。グラフからひび割れ密度は中心から坑口に近づくにつれ大きくなっていることが分かる。

ひび割れ密度が20cm/m²を超えるS001～S004, S013～S017は最大ひび割れ幅が0.5mmを超過しているため、健全度判定Ⅱa以上と評価される。



(a) スパンごとの変化



(b) TCIとの相関

図-6 ひび割れ密度の変化

特に、S017は、写真-1～4に示すように、ひび割れ幅が2mm以上と大きく、健全度判定区分をⅢとし、S015, S016は、ひび割れ幅が3.0mmを超えており、健全度判定区分はⅣとしている。

ひび割れ密度と TCI (ひび割れ指数) との間は図-6(b)に示すように、あまり良い相関がないことが分かる。

それはひび割れ密度ではひび割れの幅があまり考慮されていないのに対して、TCI(ひび割れ指数) の計算では、個々のひび割れに対し均一の幅を有すると仮定しているが、ひび割れの幅も考慮されているため、より実際のひび割れ分布状況を表していると考えられる。

具体的には、図-3と図-6(a), (b)及び写真-1～4から、S017はひび割れ密度が0.56m/m²と大きいにもかかわらず健全度判定はⅢ判定(ひび割れ幅2mm, 延長2.5m)である。これに対して、S015, S016はひび割れ密度は、0.47, 0.27m/m²とS017に比して小さくても健全度判定はⅣ判定(ひび割れ幅3mm, 延長5m以上)である。このことは、ひび割れ密度の大きさよりもひび割れ幅が考慮されたTCI評価が実際のひび割れ分布状況が表されており、健全度判定に反映されていることが分かる。

4. 振動計測と考察

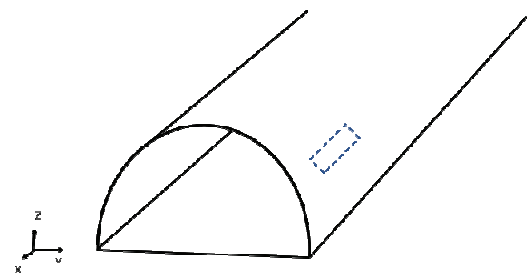
本研究では、トンネルの健全度を判定する手法として、トンネルの振動特性を用いることにし²⁾⁴⁾、対象トンネルの常時微動測定を行った。なお、振動特性測定を行ったスパンは、損傷の少なかったS007, S008と、損傷の多かったS015, S016, S017を選定した。損傷の多かった3スパンに関しては、左側肩部と右側肩部の2か所において計測を行った。

(1) 常時微動計測

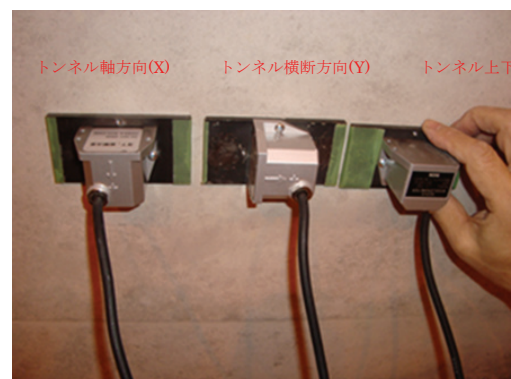
常時微動とは、地盤中を伝播する人工的または自然現象による種々の振動のうち、特定の振動源から直接的に影響を受けない状態で、様々な振動によって励起される微小な地盤振動である。常時微動測定とは、このような微小な地盤振動を測定して、地盤の振動特性の推定や地盤種別の判定などに適用されている²⁾。

ここでは、微小な振動を測定する必要があるため、測定には1mgalという微小加速度を測定することが出来るサーボ式加速度センサを用いた。図-7に常時微動計測の加速度センサ取り付け図を示す。図-7(a)の破線部に図-7(b)に示すように加速度センサを取り付けた。

対象トンネル天端部において、常時微動測定をトンネル軸方向、トンネル横断方向、トンネル上下方向の3方向で行った。得られた加速度波形の一例を図-8に示す。



(a) 加速度センサの取り付け位置



(b) 三方向の取り付け

図-7 加速度センサの取り付け

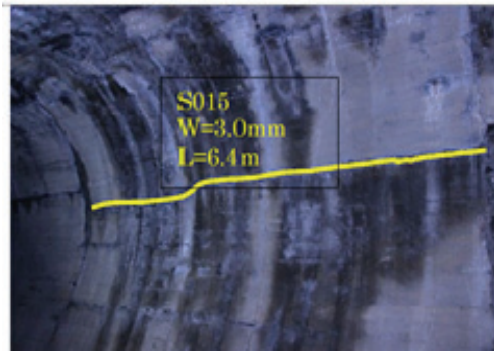


写真-1 ひび割れ【アーチ部：S015】

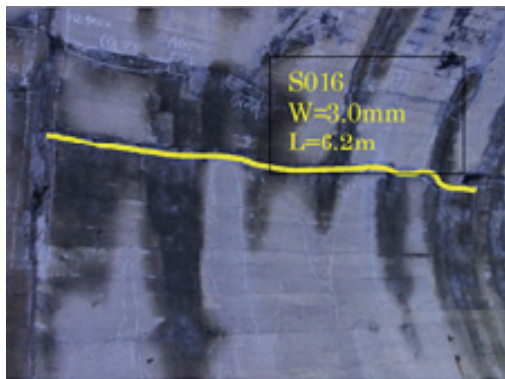


写真-2 ひび割れ【アーチ部：S016】

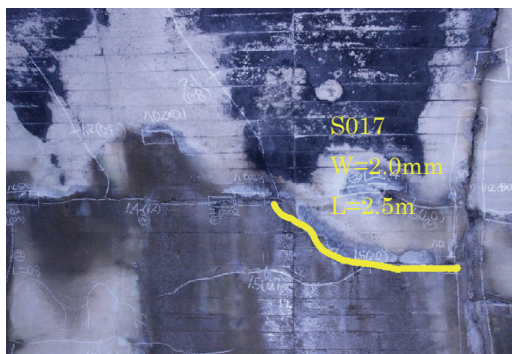


写真-3 外力によるひび割れ

【アーチ天端肩部：S017 縦断方向幅 2.0mm 延長 2.5m】

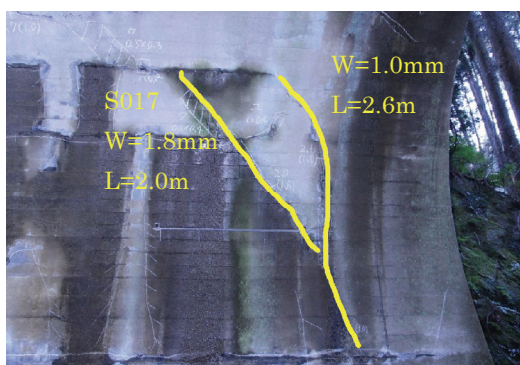


写真-4 外力によるひび割れ

【アーチ部：S017 斜方向幅 1.8mm 延長 2.0m】

(2) フーリエ変換

フーリエスペクトル解析とは、入力された信号波形（今回は常時微動測定による加速度波形）をデジタル的（離散的）にサンプリングすることにより、データとして記憶し、この時系列のデータをフーリエ変換することにより、周波数毎の振幅（フーリエスペクトル）を求める手法である。つまり、フーリエ変換とは、時間や空間座標が変数の関数を周波数が変数の関数に変換することであり、式(1)で与えられる。

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \exp(i 2 \pi f t) dt \quad (1)$$

ここで、上式の積分をフーリエ積分といい、 $H(f)$ を $h(t)$ のフーリエ変換という。 t は時間や空間座標、 f は周波数を表す。

(3) フーリエスペクトル波形

図-8に示したような加速度波形をフーリエ変換することで、図-9に示すようなフーリエスペクトル波形を得ることができる。本研究で用いた加速度センサの最大測定周波数が250Hzであるため、フーリエスペクトル波形も250Hzまでの値を用いた。

得られたフーリエスペクトル波形の平均値を式(2)により合成し、3合成ベクトル値をそのスパンの代表値とした。

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (2)$$

ただし、 F ：ベクトルの合成値

F_x ：トンネル軸方向のベクトル

F_y ：トンネル横断方向のベクトル

F_z ：トンネル上下方向のベクトル

表-1についてはフーリエスペクトルの解析結果を示す。なお、表に示すスパンNo.の①はトンネルの左側の計測結果、②はトンネルの右側の計測結果である。

表-1 フーリエスペクトル解析結果

スパンNo.	フーリエスペクトル(m ga *sec)			
	F_x	F_y	F_z	F
7①	26.200	28.500	22.500	44.777
8②	26.040	29.714	22.665	45.549
15①	25.952	28.322	22.661	44.600
15②	26.040	29.653	22.652	45.502
16①	26.160	28.670	22.872	45.050
16②	26.130	29.767	22.818	45.711
17①	26.126	28.573	22.746	44.903
17②	25.984	29.691	23.080	45.710

(4) 振動特性と空洞との関連性

対象スパンのフーリエスペクトルの解析結果を図-10にグラフとして示す。

図-11において、S015～S017では右側に空洞が大きいことがわかる。図-9と比較すると、空洞の大きい右側のほうが、空洞の少ない左側よりフーリエスペクトルの値が大きくなっていることがわかる。しかし、S008についてはフーリエスペクトルが高い値となったが、S008右側に空洞は見られなかった。この結果からS008のコンクリート内部もしくは背面に空洞とは別の不健全な箇所が存在することが推定される。

図-12にひび割れ密度とフーリエスペクトルの関係のグラフを示す。ひび割れ密度の増加に伴い、フーリエスペクトルがおおよそ増加傾向にあるが、S008が異なった挙動を示した。つまり、覆工コンクリートの健全度はその表面のひび割れだけに支配されるのではなく、覆工背面空洞や覆工と地山との付着状況にも大きく影響されることを伺わせる。

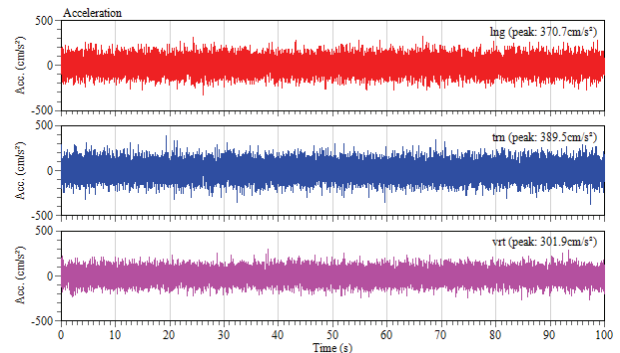


図-8 常時微動加速度波形の一例

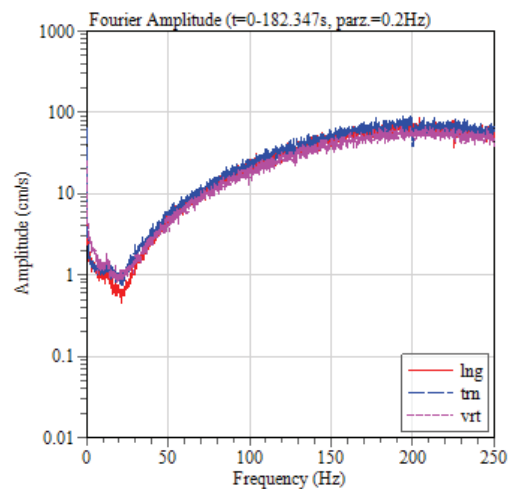


図-9 フーリエスペクトル波形

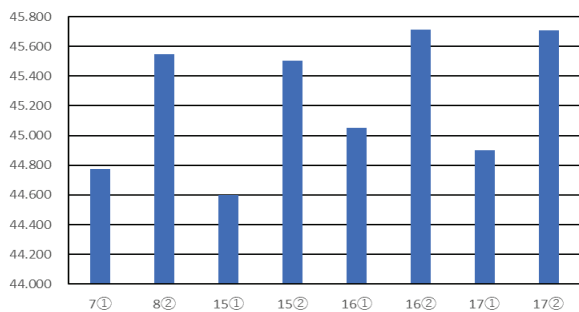


図-10 フーリエスペクトルの解析結果

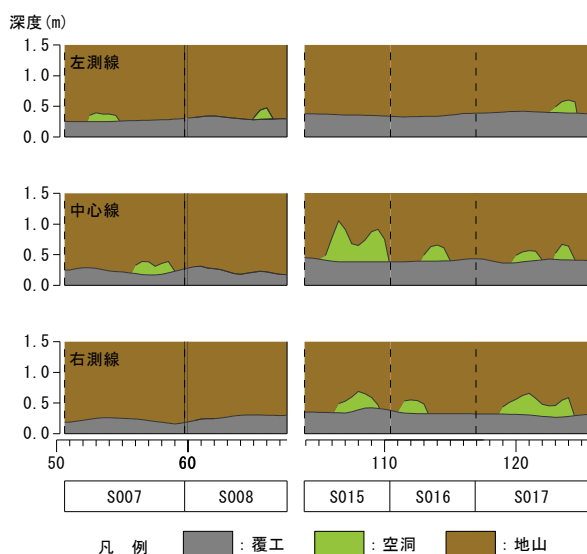


図-11 空洞調査図 (S007, S008, S015～S017)

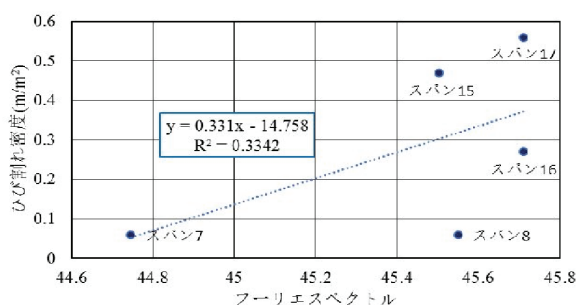


図-12 ひび割れ密度とフーリエスペクトルとの関係

5. おわりに

本報文では、大分県内の老朽化したトンネルを対象に、トンネル覆工コンクリートのひび割れ密度、振動特性および空洞に着目して評価を行った。

ひび割れの発生原因を進展性の高い外因と比較的

進展性の低い内因に特定することは、今後の維持管理手法、優先度の決定に大きく影響を与え、有効な活用が期待できる。

TCIの評価と健全度判定の相関は、TCIの値が大きいほど緊急性が高く、ひび割れ密度と相関関係にはないが、TCIはひび割れ幅も考慮されているため、より実際のひび割れ分布状況を表していると言える。

常時微動測定を行うことで、覆工コンクリート内の劣化損傷状態の違いによって、ひび割れ密度だけでは評価できない不健全部の存在可能性が推測できた。現在のトンネル評価は覆工コンクリート表面のみの評価が多いため、トンネル覆工の健全度を的確に評価するためには、本研究で用いたような振動特性などの強度パラメータも取り入れる必要があると考えられる。

デジタル画像処理を利用したひび割れの評価は、従来の目視によるひび割れ抽出手法より効果的に行え、電子データであるためアナログデータに比べてデータを比較し易いなどの利点がある。

本研究では1つのトンネルに関しての評価しか行っていないが、他のトンネルについても同様の結果が得られると考えられる。スパンごとに振動特性やひび割れ密度を算出し、劣化損傷評価ができれば各スパンについての的確な維持管理をするための優先順位をつけることも可能である。

今後、点検技術者の技術力の判断によらない客観的な基準の選定が必要となり、トンネル管理に求められる計測技術が備えるべき性能としては、(1) 交通規制を伴わない安全な方法であること、(2) 点検費用が高すぎず頻繁に行えること、(3) ひび割れの検出ができ、幅・本数・形状などの特徴が測定可能であることが挙げられる。

また、常時微動測定をより多くのトンネルに適用し、ひび割れやコンクリート内部の不健全部がトンネルの健全性に及ぼすメカニズムを解明していく。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】，2015。
- 2) 蔣 宇静，谷川征嗣，山内淑人，安田 亨，田近宏則：常時微動測定に基づくトンネル覆工の健全度評価手法の提案，トンネル工学報告集，第20号，pp.205-209，2010。
- 3) Y. Gao, Y. Jiang, and B. Li : Estimation of effect of voids on frequency response of mountain tunnel lining based on microtremor method, *Tunnelling and Underground Space*

- 4) Xuezhen Wu, Yujing Jiang, Kusaba Masaya, Tetsuya Taniguchi and Takahide Yamato : Study on the Correlation of Vibration Properties and Crack Index in the Health

(2017. 8. 11受付)

HEALTH ASSESSMENT OF AGED TUNNEL LINING BASED ON CRACK DISTRIBUTION AND VIBRATION PROPERTIES

Takashi Utsunomiya, Hiroki Yoneda, Masaya Kusaba, Xuezhen Wu,
Nana Noguchi and Yujing Jiang

In this research, the health condition of an aged tunnel in Oita prefecture was studied, focusing on the crack density, voids and vibration characteristics of concrete lining. The visual inspection method was not reliable enough as the stability of lining was influenced by the voids and the cracks that were invisible. The microtremor measurement can evaluate the whole structural condition according to the vibration properties of tunnel lining. The significance of the new method is to identify the point where the vibration is abnormal and provide a basis for further internal testing.