

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

蔣 宇静¹・谷川征嗣²・山内淑人³・安田 亨⁴・田近宏則⁵

¹フェロー会員 長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

E-mail: jiang@nagasaki-u.ac.jp

²非会員 国土交通省九州地方整備局 北九州国道事務所 (〒802-0803 北九州市小倉南区春ヶ丘10-10)

³正会員 株式会社地域地盤環境研究所 九州地盤環境研究所 (〒810-0004 福岡市早良区曙2-5-1)

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通技術本部 (〒163-6018 東京都新宿区西新宿6-8-1)

⁵正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪本社 (〒541-0052 大阪市中央区安土町2-3-13)

高度成長期に建設された多くの社会基盤施設が数十年を経過し、維持管理や補修が必要となってきた。中でも交通に供するトンネル内で変状による事故が発生した場合、その影響は極めて大きくなるため、日々の点検による変状の早期発見と的確な対策が重要となる。山岳トンネルでは、設計段階において不確定要素を多く含んでいる上に、点検や調査においても確実な手法が確立されているとは言い難い。また、時間経過による覆工コンクリートの劣化による剛性低下を検討している事例も少ないのが現状である。本研究では、昭和40年代に建設されたトンネルを対象に、ひび割れの有無に基づき健全部と不健全部に評価されたスパンの覆工コンクリートの振動特性を評価した結果、健全部のフーリエスペクトル値に比べて、不健全部のものが小さくなっていることが確認できた。

Key Words : Vibration Property, Fourier Spectrum, Microtremor, Soundness, Crack

1. はじめに

本報告で対象とした道路トンネルは、供用後約40年が経過している。そのため、覆工コンクリートにはひび割れが数多く発生しており、これらのひび割れに伴う漏水も生じていることから、現在閉鎖されているが、将来の活用を踏まえて、的確な補修、補強に関する対策工法の検討立案のための基礎データを提供するために、トンネルの健全性評価が求められている。本研究では、目視点検によりひび割れがほとんど発生していない健全スパンと数多くのひび割れが確認された不健全スパンにおいて、非破壊計測手法である常時微動測定を実施し、測定された波形に対して、振動特性の1つであるフーリエスペクトル値について比較検討し、覆工コンクリートの新しい健全度評価手法の提案を行った。

2. 検討対象とした覆工コンクリートの健全性

検討対象とした覆工コンクリートは、目視点検においてほとんどひび割れが発生していないため健全と評価されたスパンとひび割れが数多く発生しており不健全と評価されたスパンである。図-1にこれらのスパンの写真と

目視点検結果であるそれぞれのスパンの展開図を示す。

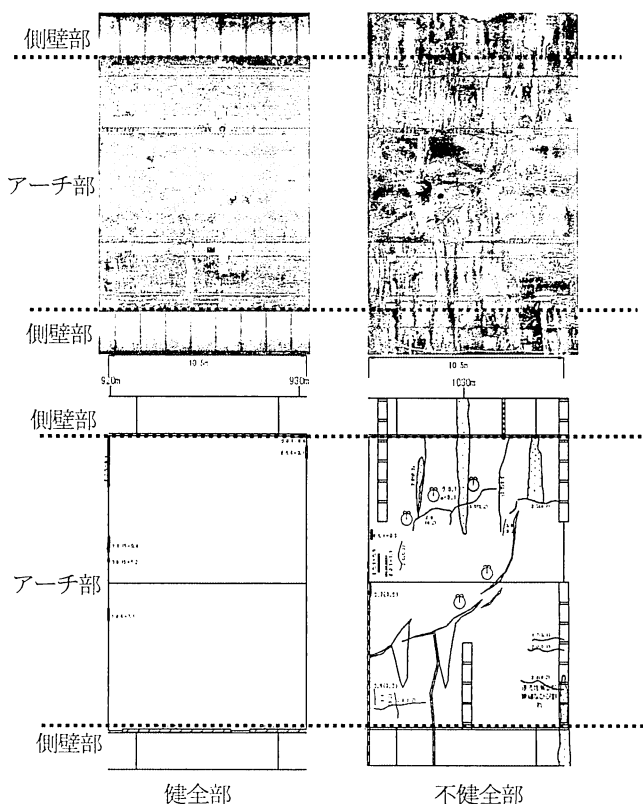


図-1 対象とした覆工コンクリートの健全性

目視点検結果から、図-1に示されるように健全であると評価されたスパンにおいては、ひび割れがほとんど見られないのに対して、不健全と評価されたスパンでは、中央にある覆工の左右を横断するひび割れは漏水が激しく、幅の広いひび割れが発生している可能性が高いものと考えられる。また、ほとんどのひび割れで漏水が発生していることから、ひび割れは覆工コンクリートを貫通している可能性が高いものと評価されている。

3. 常時微動測定

常時微動とは、図-2に示すように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、さまざまな振動によって誘起される微小な地盤振動である。常時微動測定は、この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利用するために行われる。また、構造物の常時微動を測定することにより、構造物の振動特性を推定することが可能である。

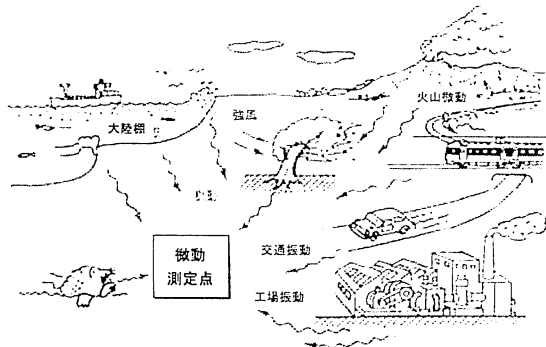


図-2 常時微動のイメージ

(1) 計測システム

数mgal～数十mgalという微小な振動を測定する必要があるため、今回の計測に用いた振動計は、1mgalという微小加速度を高精度で測定することができるサーボ式加速度センサーを用いた。図-3この加速度センサーを示し、図-4に計測システムを示す。

振動測定は、前述した健全スパンと不健全スパンのそれぞれのスパン内で実施した。測定は、図-5に示すように覆工コンクリート天端と左側壁及び道路面の3箇所で行った。測定緒元は表-1に示す通りである。

表-1 測定緒元

測定間隔	5kHz
測定時間	3分間

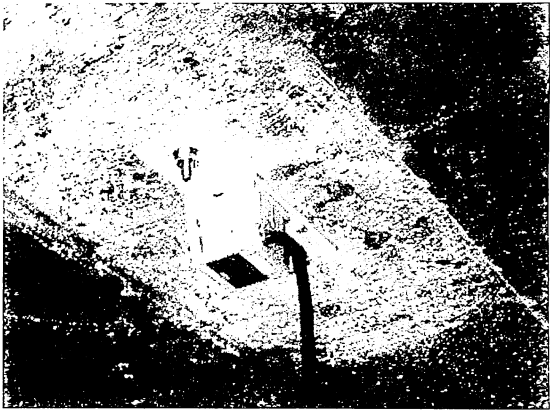


図-3 サーボ式加速度センサー

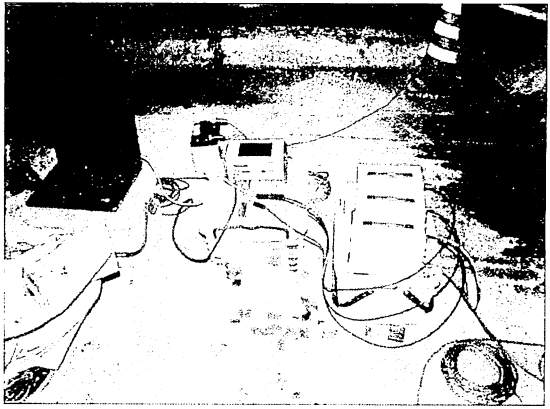


図-4 計測システム

サーボ式加速度センサーの仕様は表-2の通りである。

表-2 サーボ式加速度センサーの仕様

最大測定加速度	± 30 m/s ²
測定周波数範囲	DC～100 (Max. 300) Hz
分解能	1 mgal

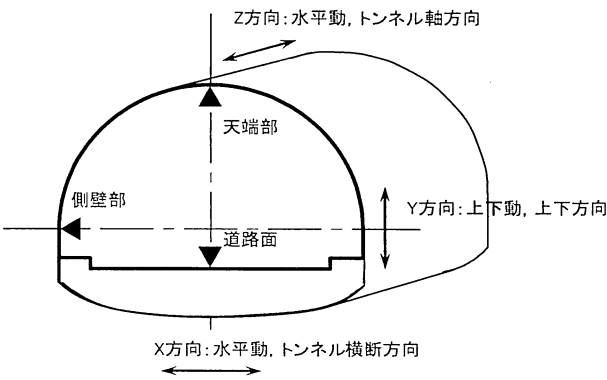


図-5 測定位置及び方向

(2) 測定結果

常時微動測定結果の一例を図-6に示す。

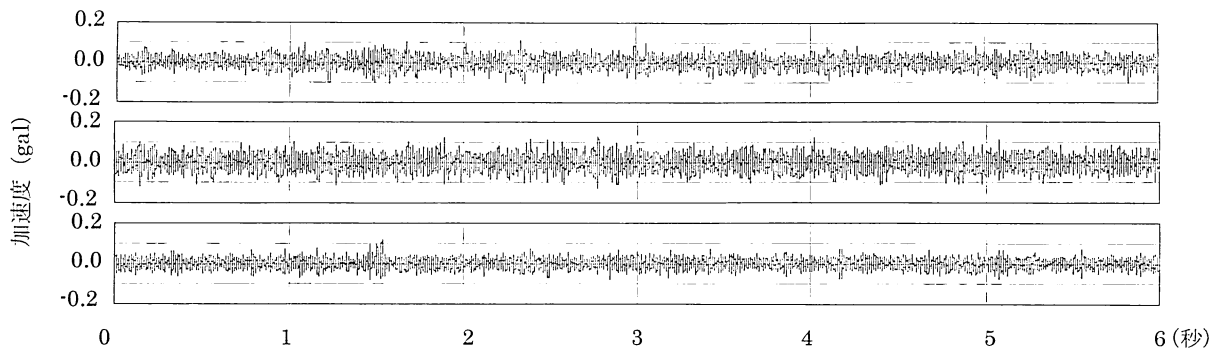


図-6 常時微動波形の一例 (上：天端，中：側壁，下：道路面)

計測は、5kHzのサンプリング間隔で3分間実施し、選定した2つのスパンで、天端、側壁および道路面の3箇所において、それぞれトンネル横断方向、上下方向およびトンネル軸方向の3成分の常時微動を測定した。

3. 覆工コンクリートの振動特性

健全と評価されたスパンと不健全なスパンにおいて、測定した常時微動波形のフーリエスペクトルを算出し、覆工コンクリートの振動特性の評価を行った。

解析に用いたプログラムの制約で、3分間180秒の波形記録のうち169秒間のデータを13秒間ずつ13ブロックに分割し、まずそれぞれのブロックのフーリエスペクトルを算出した。その後、算出された13ブロックのフーリエスペクトルの平均値を求めて、これを測定されたそれぞれの常時微動波形の代表フーリエスペクトルとした。図-7にこの解析の流れを示す。

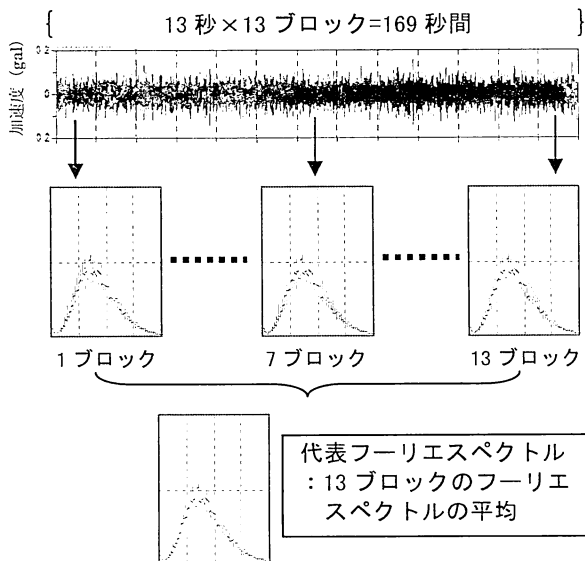


図-7 解析の流れ

このようにして算出した、健全および不健全スパンで

の天端、側壁および道路面における3成分の合計18個の代表フーリエスペクトルのうち、図-8にその一例を示す。

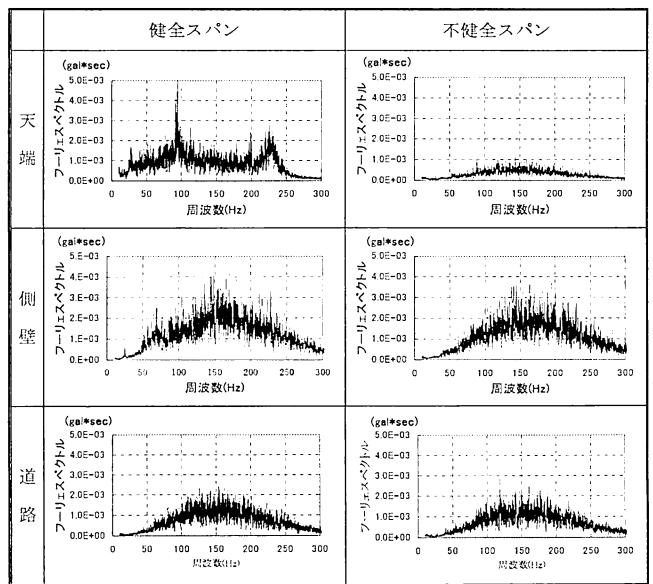


図-8 フーリエスペクトルの一例 (上下方向)

常時微動のフーリエスペクトルは、トンネル横断方向、上下方向およびトンネル軸方向において、側壁での値が大きくなっていることが判明した。また、健全スパンと不健全スパンにおいて、側壁と道路面におけるフーリエスペクトルでは大きな差は生じていないが、天端でのフーリエスペクトルに顕著な違いを生じていることが判明した。

4. 覆工コンクリートの健全度評価手法の提案

覆工コンクリートにおける常時微動測定において、健全と評価されたスパンと不健全と評価されたスパンにおいて、その常時微動のフーリエスペクトルに差が生じていることから、この差を用いて健全度を評価する新しい手法について以下にその特徴を示す。

一般的なフーリエスペクトルでの評価手法では、卓越

周波数やその値の変化に基づいて実施している場合が多い。この場合には、測定地点近傍における交通や工事振動の影響や測定点の覆工コンクリート物性や剛性の影響を受け、測定地点ごとに違う値となる可能性が高い。基本的には、健全度の違いにより卓越周波数が変化するものと考えられるが、その卓越周波数の変化と健全度の関係を定量的に評価することは難しい。

今回提案する評価手法は、卓越周波数ではなく、フーリエスペクトル自体を用いている。フーリエスペクトル値は、対象とする波形の振幅特性を示しているものであり、ある意味では波形のエネルギーとも考えられる。フーリエスペクトルは、解析に用いた周波数ごとの値である。本研究では、健全および不健全スパンでの天端、側壁および道路面における3成分の合計18個の代表フーリエスペクトルに対して、それぞれの代表フーリエスペクトルの平均値を求め、健全および不健全スパンにおいて測定された常時微動のフーリエスペクトルの変化（つまりエネルギーの変化）を比較した。表-3にこれらの比較結果一覧を示す。

表-3 健全および不健全スパンにおける比較結果一覧

計測箇所		加速度計 測定方向		
		上下方向	トンネル横断方向	トンネル軸方向
天端	健全	2.28	0.96	1.19
	不健全	0.83	1.19	1.56
側壁	健全	3.36	3.04	3.05
	不健全	3.13	2.99	3.08
道路面	健全	2.01	1.79	1.71
	不健全	1.98	1.74	1.71

(単位:10⁻³ gal*sec)

今回の測定では、すべての測定点において同時に計測していないため、道路面の測定点を基準として測定を実施した。本トンネルでは、インバートを打設していないので、道路面上はほぼ同じ条件とみなすことができるものと推定した。表-3に示されているように、道路面においては、健全および不健全スパンに関わりなく、ほぼ同じ値を示していることから、同時に測定が行われなくても、ほぼ同じ条件で計測できたものと判断した。

覆工コンクリート内を伝播してくる波は、ひび割れの存在により影響を受けるものと判断される。一般的には、均質なコンクリート部のみを伝播してくる場合とひび割れを含んだ不均質な部分を伝播してくる場合では、ひび割れ部を透過することによるエネルギーロスが発生するものと想定される。表-3から判断すると、天端部の上下

方向において、不健全スパンが健全スパンよりも小さな値を示しているが、それ以外ではあまり大きな差を発生していないことがわかる。またトンネル横断および軸方向においては、健全スパンのほうが小さな値を示している場合もある。したがって、表-3に示すような上下方向、トンネル横断方向およびトンネル軸方向のそれぞれの成分ごとの評価では、覆工コンクリートの健全性を評価することは難しいものと判断される。そこで本研究では、常時微動が3次元的挙動を示していることから、測定点における代表値として、式(1)で示すようなベクトル値を考えた。

ベクトル値=
$$\sqrt{(\text{上下方向})^2+(\text{トンネル横断方向})^2+(\text{トンネル軸方向})^2} \quad (1)$$

表-4に式(1)より算出した健全および不健全スパンにおける3次元のベクトル値を示す。

表-4 健全および不健全スパンにおけるベクトル値の比較

計測箇所		ベクトル値
天端	健全	2.75
	不健全	2.13
側壁	健全	5.47
	不健全	5.31
道路面	健全	3.19
	不健全	3.14

(単位:10⁻³ gal*sec)

表-4から、道路面におけるベクトル値は、健全スパンと不健全スパンにおいて差が生じていないが、天端と側壁においては、不健全スパンのベクトル値が健全スパンの値より小さくなっていることがわかる。また、天端における健全スパンと不健全スパンのベクトル値の低下率が2割以上であるのに対し、側壁における低下率は1割にも満たない結果となっている。これは天端のアーチ部に比べて側壁部においては、ほとんどひび割れが発生していないことに起因するものと考えられる。

5. まとめと今後の課題

健全スパンと不健全スパンにおいて、常時微動測定波形のフーリエスペクトルを用いた振動特性評価により、健全部と不健全部における、天端部での3次元のベクトル値に顕著な差が生じていることを確認した。同時に測

定したひび割れのほとんど発生していない側壁部において、この値に変化は生じていないことから考えると、天端部での差は、アーチ部の覆工コンクリートに発生しているひび割れによるものと推定されることから、健全度合の違いを示しているものと想定できる。

今回の研究では、健全部と不健全部の2箇所における常時微動測定結果に基づく評価であるため、健全度の定量的評価にまでは至っていない。今後、より正確な健全

度の評価が可能となるように、健全部と不健全部での測定ケースや評価結果を増やしていくことが望まれる。

謝辞：本研究にあたり、パシフィックコンサルタンツ株式会社 石田智朗氏には現地計測ならびにデータ整理に際して、ご協力を頂きました。また、株式会社 地域地盤環境研究所 ラ・アウン氏にはデータ解析にご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

PROPOSAL OF SOUNDNESS EVALUATION TECHNIQUE OF TUNNEL LINING BASED ON MICROTREMOR MEASUREMENT

Yujing JIANG, Masatsugu TANIGAWA, Yoshito YAMAUCHI,
Tooru YASUDA and Hironori TADIKA

It is difficult to say that the soundness evaluation technique for tunnel lining has perfectly been established. Moreover, the case examined the stiffness degradation due to deterioration of concrete lining caused by the elapsed time is also very few. In this report, the vibrational property of a road tunnel constructed in the second half of 1960s is evaluated based on microtremor measurement of the soundness and unsoundness parts classified by the distribution of cracks on concrete lining. As a result, the difference of vibrational properties for the soundness and unsoundness parts of lining was confirmed. It is considered to be the cause that the vibrational wave propagated in concrete lining generates an energy loss in the crack parts. Therefore, it is thought that the microtremor measurement proposed in this report could be a new approach for evaluating the soundness of tunnel with concrete lining.