

寒冷地のトンネル覆工における常時微動記録を用いた劣化推定に関する研究

糸井 謙介¹・須藤 敦史²・丸山 収²・佐藤 京³・西 弘明³

¹学生会員 東京都市大学工学部工学研究科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

E-mail:omaruya@tcu.ac.jp

²正会員 東京都市大学工学部都市工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

E-mail:a.sudou@iwata-gr.co.jp

³正会員 (独)土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

E-mail:taka4@ceri.go.jp

北海道では昭和30年代後半から現在までに250もの国道トンネルが建設されている。最近はこちらのトンネル構造物の長寿命化とともに、既設の構造物を診断して健全度を確かめ、必要に応じて補強する維持管理が重要になってくる。一方、北海道において多くの在来工法のトンネル覆工表面は、湧水に伴うつらら防止のための面導水工やひび割れ対策工などにより、目視点検(作業)や劣化評価が特に困難となっている。そこで本研究では、トンネル覆工における常時微動から、覆工コンクリートの振動特性を求め、これにより損傷程度を同定する方法を提案し、実際の観測値より提案手法の有用性を示している。

Key Words :Markovian transition probability, degradation process, tunnel management

1. はじめに

北海道では昭和30年代後半から道路網の拡充にとともに山岳トンネルの整備が進められているが、現在では建設から30年以上を経過したトンネル数が40%以上となってきたため、今後は寒冷地特有の劣化要因を考慮した性能水準の低下防止などを実施しながら、ライフ・サイクル・コストの低減化が図れるような補修・維持管理計画が急務となっている。

トンネルにおける覆工コンクリートの経年劣化が進行すると、コンクリート片の落下する危険性が増加して交通に対する影響は極めて大きくなる。

したがって、日々の点検による劣化箇所の早期発見と適切な対策が重要となる。現状では定期点検は目視点検や写真撮影によるデータ抽出により行われており、膨大な数のトンネルの劣化データを管理するのは困難であり、覆工コンクリートの劣化状態を定量的に求めることが必要であり、現状では①ひび割れ、②浮き・はく離、③漏水、④目地ずれ・開き、⑤豆板・空洞、⑥遊離石灰など目視点検値より、覆工コンクリートの劣化状態を求めている。

また、北海道における多くの在来工法のトンネル覆工コンクリートの表面は、湧水に伴うつらら防止のための

面導水工やひび割れ対策工(写真-1,2)などにより、目視点検(作業)や劣化評価が特に困難となっている。

一方、橋梁などの構造物では固有振動数などを用いて構造物の健全度を間接的評価する方法¹⁾³⁾が普及しており、トンネル構造物においても常時微動で劣化を推定⁴⁾することができれば、検査作業の省力化および補修・補強工により直接点検作業が不可能な個所の劣化評価が期待できる。

そこで本研究は、常時微動によるモニタリングシステムを構築することを目的として、旧サロマトンネルにおいて常時微動データのスペクトル解析を行い、トンネル覆工コンクリートの振動特性と劣化の関係を考察した。

次に観測データをARモデル(Autoregressive Model)⁵⁾にモデル化し、健全部と不健全部におけるAR係数の差異の抽出を試みた。

2. トンネル覆工コンクリートの常時微動

一般的に常時微動は、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誘起される微小な地盤振動である。

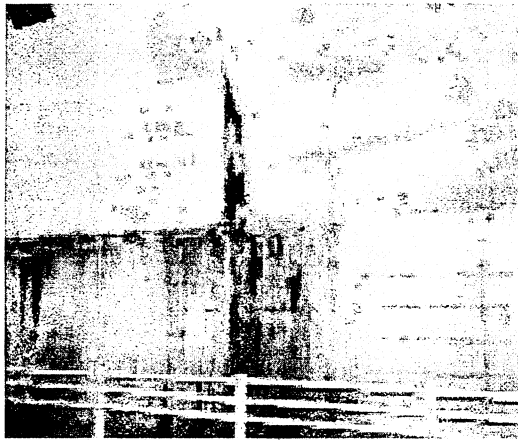


写真-1 覆工コンクリートの湧水・漏水状況

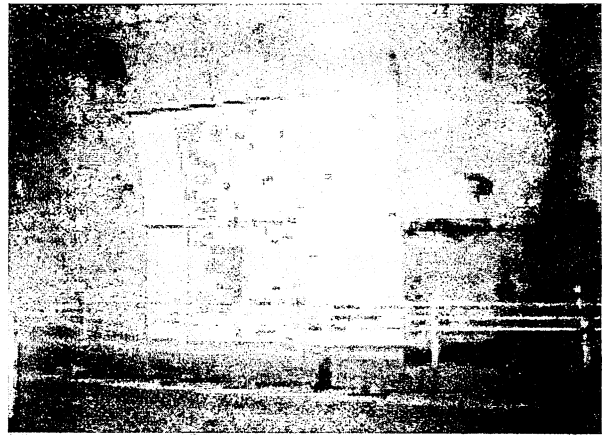


写真-2 覆工コンクリートの面導水

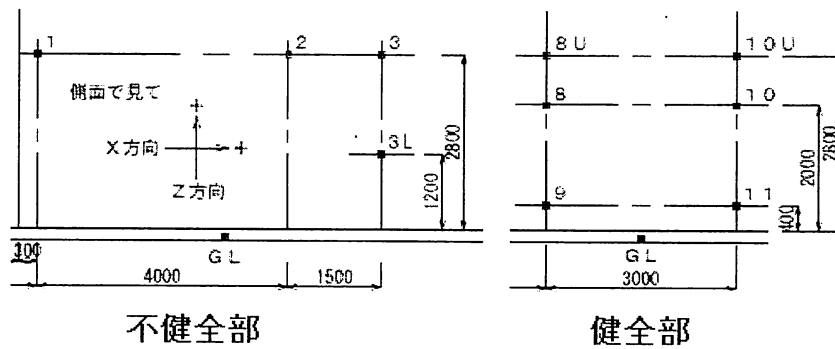


図-1 覆工コンクリートの計測位置

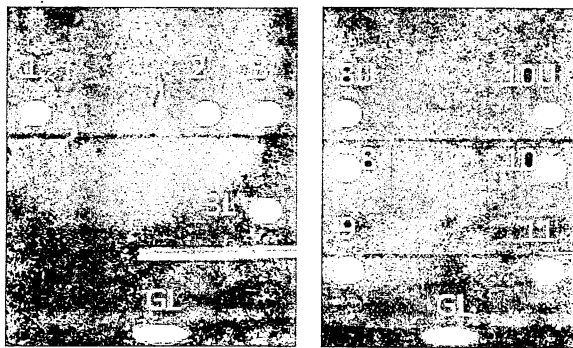


写真-3 観測点と覆工コンクリートの状態



写真-4 測定機器

したがって、構造物における常時微動の観測波形は、地盤振動特性の影響を受けない構造物のみの振動特性であるため、劣化特性の状態も含んだ波形であると考えら

れる。

(1) 対象とするトンネル覆工コンクリート

本研究で検証したトンネルは、北海道常呂郡佐呂間町字栃木と北見市北陽を結んでいた一般国道333号旧サロマトンネルの覆工壁面で実施した。

まず目視点検により、ひび割れのある不健全部とひび割れの無い健全部を評価して、常時微動の測定点として選定した。図-1、写真-3に常時微動測定時の計測器配置図を示す。

(2) 常時微動測定

構造物の振動特性を推定する場合は、常時微動の応答（出力波）を用いる方法が一般的である。ここで構造物に対する入力波の時刻歴を $g(t)$ ，出力波の時刻歴を $f(t)$ として、それぞれのフーリエ変換を $G(\omega)$ ， $F(\omega)$ とすると以下のように定義される。

$$Z(\omega) = F(\omega) / G(\omega) \quad (1)$$

$Z(\omega)$ が伝達関数となり、伝達関数の卓越振動数が構造物の固有振動数と一致する。

また常時微動は $G(\omega)$ が自然・人工的な種々の振動

(ホワイトノイズ)であることより、常時微動が構造物の振動特性を表している。

したがって、この微小な地盤振動（常時微動）を測定すれば、地盤の振動特性の推定や地盤種別の判定などに利用が可能である。また同様に、構造物上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も可能である⁹⁾。

本研究におけるトンネル覆工コンクリートの常時微動測定は、サーボ式加速度計を用いて計測した。用いた測定機器を写真-4、加速度計の仕様を表-1に示す。

また、本観測で旧サロマトンネルにおける覆工コンクリート表面での測定は選定した側壁面で、それぞれトンネル軸方向（X），横断方向（Y），上下方向（Z）の3成分を15分間計測した。得られた常時微動波形の一例を図-2に示す。

3. 覆工コンクリートの振動特性

目視により健全と不健全と評価されたスパンにおいて、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評価を行った。

モニタリングで得られた連続的なトンネル覆工の性能代替指標を、技術者に対するアンケート調査とAHP解析を用いて、レーティングされた性能照査区分への変換方法を以下に記述する。

フーリエ解析では計測ノイズと思われる高周波成分が検出されたため、100Hz以上の成分を除去した。算出したフーリエスペクトルの3成分を合成し、健全部と不健全部におけるフーリエスペクトルを図-3に示す。

図-3から健全部では45Hz付近の卓越周波数が大きいのに対し、不健全部では30Hzから45Hzあたりに卓越成分が見られる。これらから、健全部と不健全部の振動特性に違いがみられた。

4. ARモデルによる劣化成分の抽出

ARモデルは、時系列データの過去の値を説明変数とする回帰モデルである。これらの性質を利用し、覆工コンクリートの劣化を検知する値として、AR係数に着目して劣化推定を試みる。以下にARモデル式を示す。

$$y_{(n)} = \sum_{i=1}^m a(i)y(n-i) + \varepsilon(n) \tag{2}$$

ここで m はモデル次数、 a は自己回帰係数、 ε は期待値0、分散一定のホワイトノイズ（白色雑音）を示す。

AR係数はユールウォーカー方程式⁷⁾を解くことで求

表-1 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 Hz（±10 %）
分解能	10 ⁻⁵ m/s ²

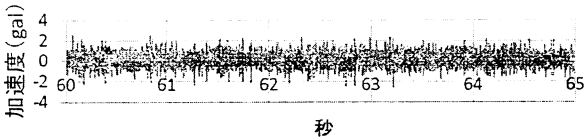


図-2 常時微動波形の一例

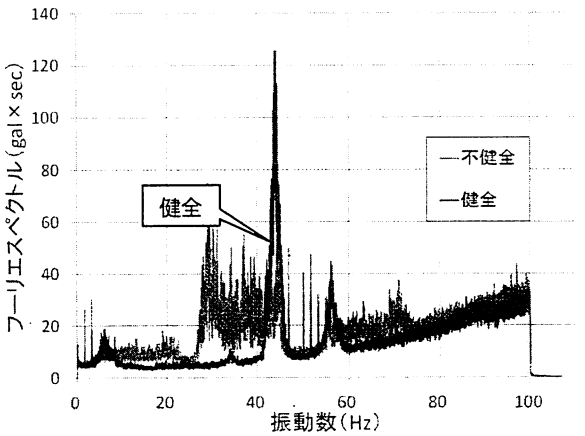


図-3 フーリエスペクトル

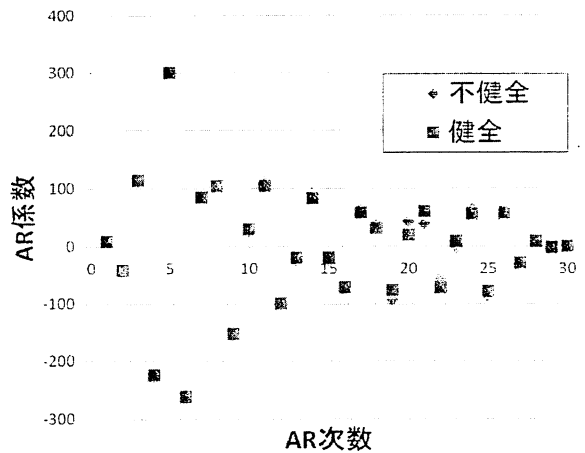


図-4 AR係数の分布一例

められる。常時微動データよりAR係数の推定を行い、健全部と不健全部の推定結果を図-4に示す。今回はARモデルの次数を30として計算した。

5. 結 論

本研究では、スペクトル解析により覆工コンクリート

断面における健全部と不健全部の振動特性の違いを確認できた。

しかし、AR係数から健全、不健全の違いを読み取ることは困難であった。また、各フーリエスペクトルにはノイズが混入している傾向がみられ、卓越周波数の特性表示が顕在化していない可能性がある。

今後は、多くのデータを用いてフーリエ解析による振動特性の把握やミクロな視点による詳細な劣化データと振動特性の関係性（同断面）から考察を行い、劣化検知の精度についても評価する。

また、AR法による推定制度を再度検討する。その後、サポートベクターマシンなどにより劣化状態の検知を試み、常時微動を用いた劣化診断手法の確立を目指す。

参考文献

- 1) 中島章典, 中野貴代美, 中村晋: 常時微動に基づく独立橋脚および橋梁完成系の振動特製の把握, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.305-314, 2010, 3.

- 2) 向坊恭介, 林康裕, 森井雄史, 飯場正紀: 常時微動計測による中層鉄筋コンクリート造建物の振動特性の分析, 建築学会技術報告集 第 13 巻 第 25 号 pp.43-48, 2007.
- 3) 秦吉弥, 一井康二, 加納誠二他: 常時微動計測に基づく高速盛土の入力地震動推定法の検討, 土木学会論文集 F Vol.65 No.4, pp.529-541, 2009.
- 4) 蔣宇静, 谷川征, 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 巻, pp.205-209, 2010, 11.
- 5) 丸山收, 相沢旬, 星谷勝: ARMA モデルによる既存構造物の動特性の推定, 土木学会論文集 第 416 号, I-13, pp.439-447, 1990.
- 6) 広兼道幸, 野村泰稔, 楠瀬芳之: コンクリート構造物のひび割れ性状に基づく損傷度分類への線形 SVM の適用, 土木学会論文集 A Vol.64 No.4, pp.739-749, 2008.
- 7) 得丸 英勝ほか: 計測・測定ランダムデータ処理と応用, 培風館, 1984, 2.

(2012.9.3 受付)

IDENTIFICATION OF COLD REGION TUNNEL LINING DEGRADATION BASED ON MICROTREMOR MEASUREMENT

Keisuke ITOI, Atsushi SUTOH, Osamu MARUYAMA, Takashi SATO and Hiiraki
NISHI

In this research, the microtremor measurement is conducted for evaluation of tunnel lining degradation. The natural frequencies are identified including the effect of the ground cognition from the microtremor measurement. The difference of vibration properties for the frequency of tunnel lining were confirmed. And, their degradation processes are characterized by the tunnel management system. The applicability of the identification methodology is investigated by the inspection data set of tunnel linings in Hokkaido.