

トンネル変状監視における リアルタイム計測データの処理に関する研究

津野 究¹・蒲地 秀矢²・舟橋 孝仁³

¹正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: tsuno@rtri.or.jp

²正会員 (株) ジェイアール総研情報システム 土木計測部 (〒185-8540 東京都国立市北1-7-23)

³正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: tfuna@rtri.or.jp

トンネルの変状監視に自動計測を用いた場合膨大な計測データが蓄積されるが、計測データを有効に活用するためには、温度の日変化等に起因する変動を考慮したデータ処理が必要となる。本研究では、まず、無線センサを活用した計測により得られたひび割れ幅のリアルタイム計測データを用い、これを周波数分析することにより、スペクトルの特徴を把握した。また、サンプリング間隔の異なる計測データのスペクトルを比較することにより、サンプリング間隔が及ぼす影響について検討した。さらに、リアルタイム計測データにローパスフィルタをかけることにより、温度の日変化等に起因する変動や誤差が除去することを確認した。

Key Words : tunnel, monitoring data, data processing, Fourier transform, filtering

1. はじめに

これまで、トンネルの長期的な変状監視に自動計測を導入しリアルタイムにデータを取ることは一部の事例^{1)~2)}を除いて稀であった。しかし、近年、無線センサを活用した計測技術も開発され^{3)~4)}、トンネルの長期的な変状監視に自動計測を用いることが十分可能となった。その一方、自動計測を用いることによって、データ取得頻度が高くなり膨大な計測データが蓄積されるが、温度の日変化等に起因する変動や誤差の影響を受けて十分活用できないという課題もある。トンネルは、高架橋などの明かりの構造物と比べて、温度変化が小さいが、偏圧や地すべりの影響を受ける場合など土被りが比較的小さい坑口付近で変状が見られる例も多く、このような場合には気温の日変化の影響も小さくないと推測される。したがって、自動計測により得られたリアルタイム計測データを有効に活用するためには、温度の日変化等に起因する変動を定量的に把握して適切な計測間隔を設定するとともに、データに含まれる温度変化等に起因する変動や誤差を除去するデータ処理手法の開発が望まれる。

また、供用中のトンネルに対して近接施工が行われる

場合、期限を限定して自動計測を行い影響を監視する事例も多い。ここでは、計測データが管理基準値を超えていないことを監視するのが一般的であるが、温度の日変化等に起因する変動によって管理基準値を一時的に超えることも想定される。近接施工に起因する影響を即時に把握するためには、データに含まれる温度変化等に起因する変動や誤差を除去する手法が必要となる。

以上を踏まえ、無線センサを活用した計測により得られたひび割れ幅のリアルタイム計測データ⁵⁾を用い、これを周波数分析することにより、スペクトルの特徴を把握した。また、サンプリング間隔の違いが及ぼす影響について検討した。さらに、計測データにローパスフィルタをかけることにより、温度の日変化等に起因する変動や誤差が除去することを試みた。

2. リアルタイム計測データの周波数分析

(1) 計測データの概要

鉄道単線トンネルにおいて、無線センサを活用してひび割れ幅の自動計測を行った。トンネル覆工にあるひび

割れにπ型のひずみ式ひび割れ幅計（株）東京測器研究所、ひずみゲージ式変換器パイ型変位計PI-5、感度1000μひずみ/mm）を設置し、これに無線センサ子機を接続し、坑口付近に設置した親機までデータを無線で送信させた。また、親機に送信したデータは、坑外の小屋に設置したパソコンとUSBケーブルで接続して収録した。

使用した無線センサは、ZigBee規格の無線を用いている。子機は、新たに開発した小型のシグナルコンディショナと無線機から構成され、単三型リチウム1次電池（3.6V）4本で駆動させ、電池も含めて幅10cm、奥行き10cm、高さ3.5cmの防水・防塵容器に格納した。子機には、温度センサを内蔵させて、ひび割れ幅のデータと同時に温度データも収録した。なお、過去に実施した性能確認試験³⁾では、トンネル内で通信距離140mまで伝送可能であることを確認している。

データの概要を表-1に、計測データを図-1に示す。計測は、トンネル坑口近傍と、坑口から15mおよび87mの位置で行っており、No.1～No.3は、過去に計測したNo.4～No.6³⁾⁵⁾と同じ位置で計測しているデータである。No.1～No.3については、計測開始から11ヶ月経過した現在も計測中であり、10分間隔で計測した場合、電池交換無しで1年～2年程度使用できる仕様としている。

本検討では、基本的に180日分のデータを用いた。ただし、No.5およびNo.6については、計測頻度やプログラムの設定を変えて電池消耗の傾向を検討したことにより180日未滿で計測が終了しており、それぞれ165日および90日分のデータを用いた。全測点とも、データの欠落発生率は0.1%以下であることを確認していることから、表中のサンプリング間隔は、取得期間をデータ数で割ることにより算出している。

図-1中の温度の計測データに着目すると、坑口近傍（No.1およびNo.3）では温度の日変化が顕著である。同様に、ひび割れ幅も温度の日変化に合わせて±0.1mm以下のオーダーで変化しており、温度上昇とともにひび割れ幅が小さくなる傾向も確認できた。一方、それ以外に点では、日変化が坑口近傍と比較して温度変化が小さく、これに合わせてひび割れ幅の日変化も坑口近傍と比べて小さい傾向となっている。

表-1 使用したデータの概要

No.	坑口からの距離	データ取得期間	データ数	サンプリング間隔
1	坑口近傍	180日	30,695	8分27秒
2	15m	180日	30,786	8分25秒
3	87m	180日	30,206	8分35秒
4	坑口近傍	180日	26,020	9分58秒
5	15m	165日	226,026	1分03秒
6	87m	90日	100,533	1分05秒

(2) 計測データのフーリエ変換

図-1に示すひび割れ幅の計測データを時刻歴の波形とみなし、周波数分析を行った。ここでは、フーリエ変換（フーリエ級数展開）を行ってフーリエ級数を算出し、横軸を周波数から周期に変換して、周期とフーリエ級数の関係を図示した（図-2）。これより、いずれの測点についても、周期24時間に明瞭なピークが見られ、坑口に近いほどこのピークの成分が大きい傾向が確認できた。温度についても、同様に、周波数分析した結果を図-3に示すが、ひび割れ幅と同傾向を示している。これより、ひび割れ幅のスペクトルで見られたピークは、温度の日変化に関連するものであり、日変化の影響を受けやすい坑口に近いほど顕著になったと考えられる。

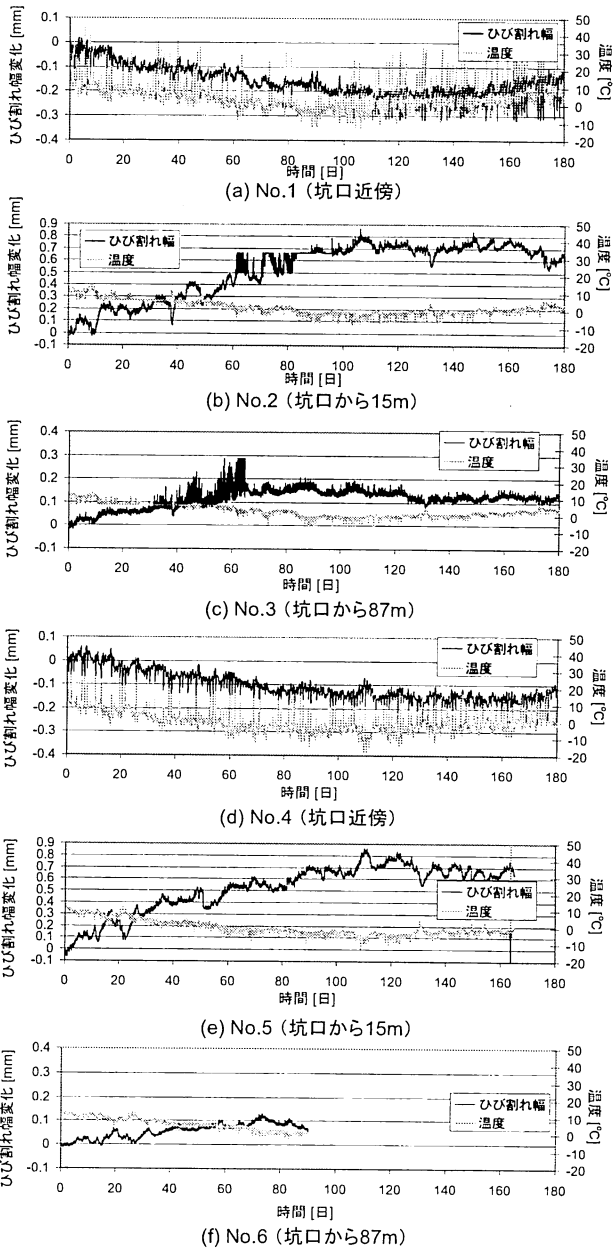
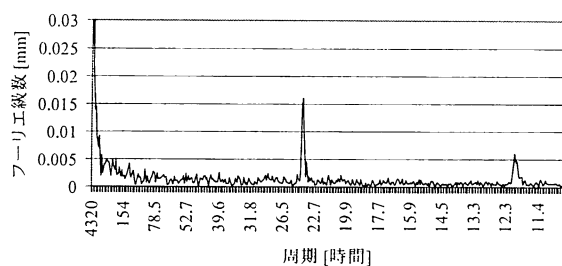
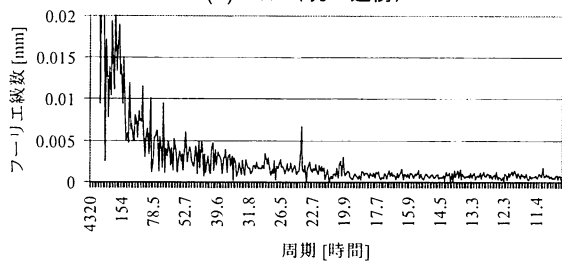


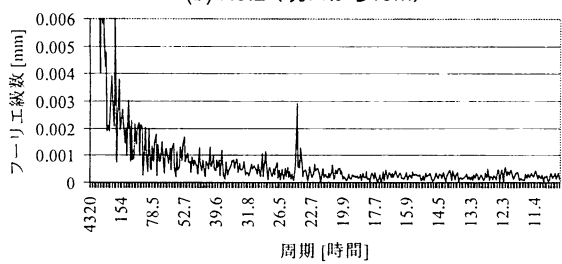
図-1 検討に用いた計測データ



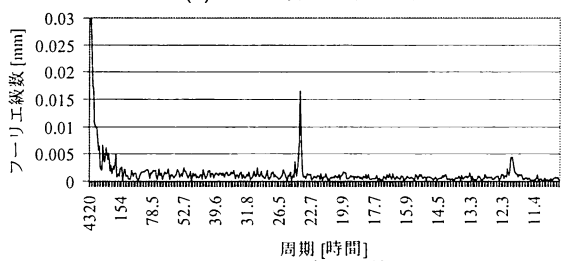
(a) No.1 (坑口近傍)



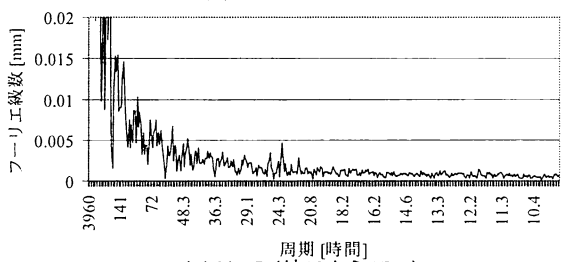
(b) No.2 (坑口から15m)



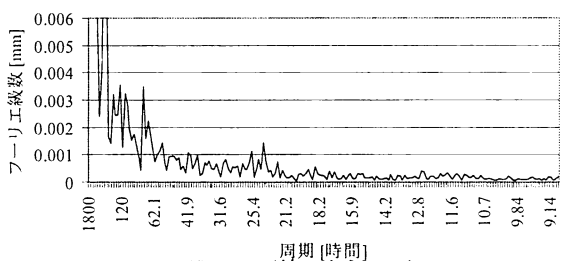
(c) No.3 (坑口から87m)



(d) No.4 (坑口近傍)

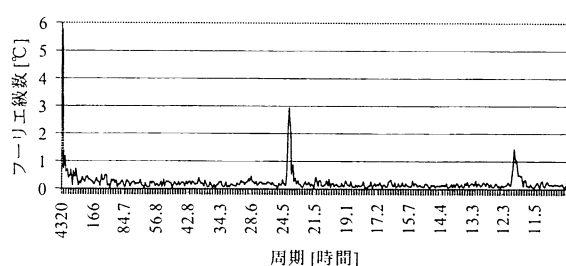


(e) No.5 (坑口から15m)

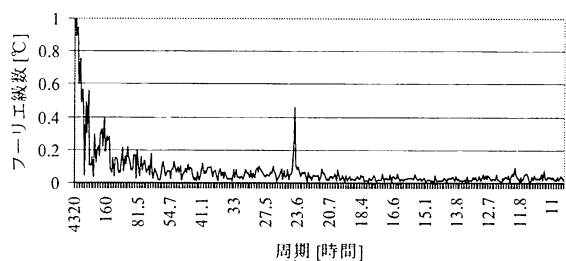


(f) No.6 (坑口から87m)

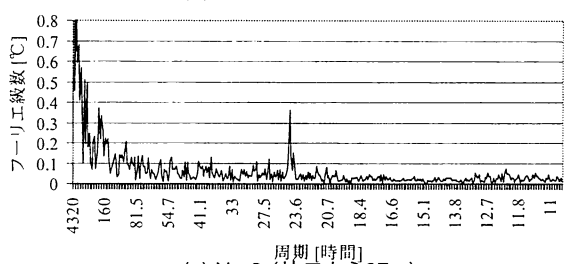
図-2 周期とフーリエ級数の関係 (ひび割れ幅)



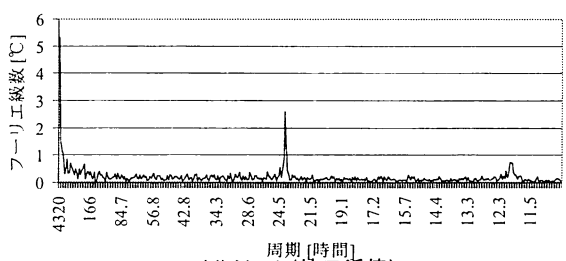
(a) No.1 (坑口近傍)



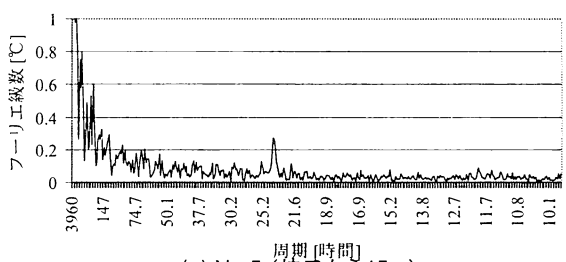
(b) No.2 (坑口から15m)



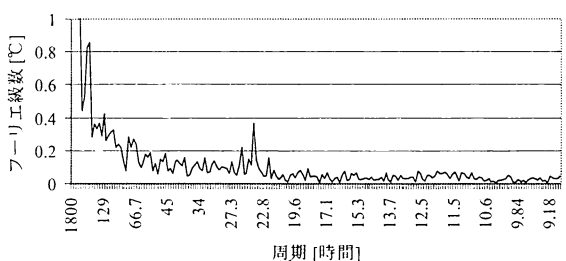
(c) No.3 (坑口から87m)



(d) No.4 (坑口近傍)



(e) No.5 (坑口から15m)



(f) No.6 (坑口から87m)

図-3 周期とフーリエ級数の関係 (温度)

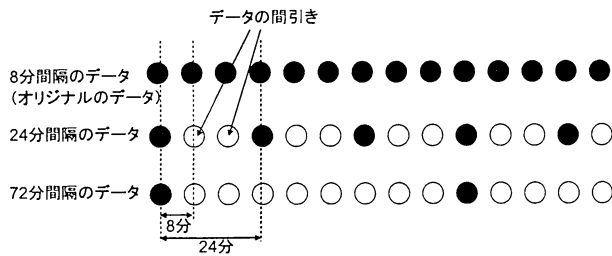


図-4 サンプル間隔を変えたデータの作成

(3) サンプル間隔を変えた場合の検討

長期的に自動計測を行う場合、適切なサンプリング間隔を設定する必要がある。とくに、無線センサを活用して計測を行う場合、計測およびデータ送信の頻度が高くなるほど電力消費が多くなることから、サンプリング間隔はバッテリーの設定などにも影響する重要な因子となる。そこで、図-4のようにデータを間引くことによりサンプリング間隔の異なるデータを作成して周波数分析を行い、スペクトルを比較した。ここでは、(2)と同様に周期とフーリエ級数の関係を求めてオリジナルの計測データと比較している。

結果の一例を図-5に示す。ここでは、No.2のひび割れ幅の計測データについて、25分間隔、1時間15分間隔、5時間3分間隔および10時間6分間隔のデータのスペクトルと、オリジナルデータ（8分25.2秒間隔）のスペクトルを比較したものである。これより、25分間隔のデータのスペクトルは、オリジナルデータとおおむね一致しているが、サンプリング間隔が大きくなるほど差が大きくなり、5時間3分間隔および10時間6分間隔のデータのスペクトルについては、24時間より長い周期の成分についても差が見られる。

そこで、24時間より長い周期の各周波数（周期）について、間引いたデータとオリジナルデータのフーリエ級数の差分を計算し、その絶対値を総和した。ひび割れ幅の計測データについての結果を図-6に、温度の計測データについての結果を図-7に示す。なお、オリジナルデータのサンプリング間隔にも図-6では0.001mmに、図-7では0.1℃にプロットを設け、点線で結んでいる。

図より、全ての計測データについて、サンプリング間隔が大きくなるほど、オリジナルデータとのスペクトルの差分が大きくなる傾向が確認できる。これは、サンプリング間隔が大きくなるほど、日変化より長い周期の成分に及ぼす影響も大きくなることを定量的に表していると考えられる。更なる計測データの蓄積と検討は必要であるが、このようにサンプリング間隔の異なるデータを周波数分析し、長い周期の成分を比較することにより、サンプリング間隔が長期変状傾向に及ぼす影響が定量的に検討できる可能性があると考えられる。

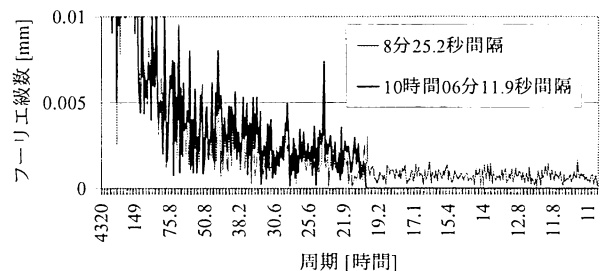
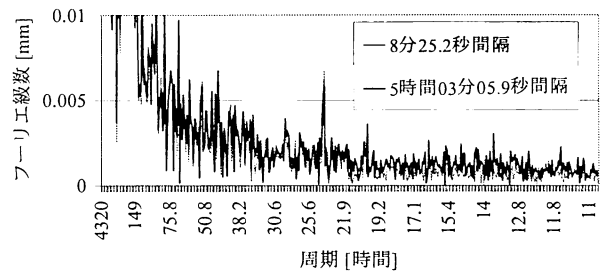
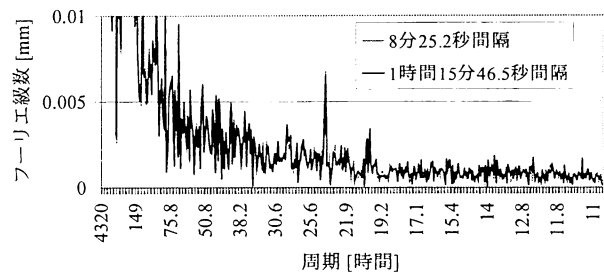
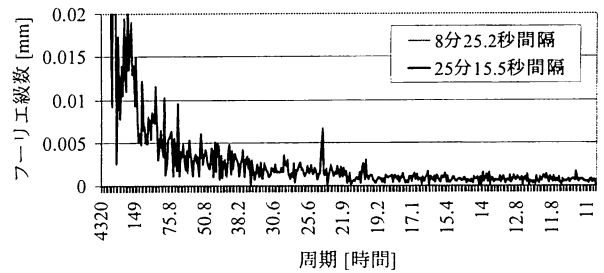


図-5 サンプル間隔を変えた時のスペクトルの比較
(No.2, ひび割れ幅)

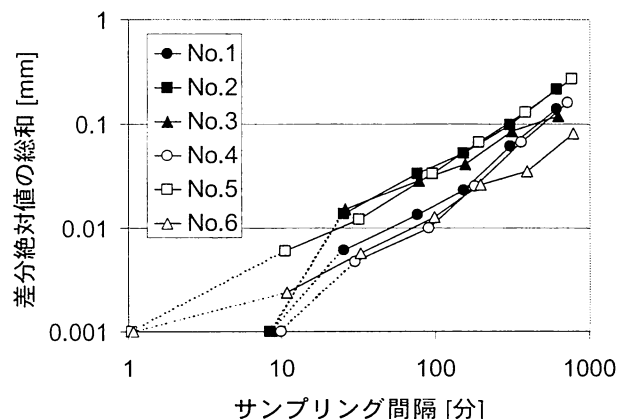


図-6 スペクトルの差分（ひび割れ幅）

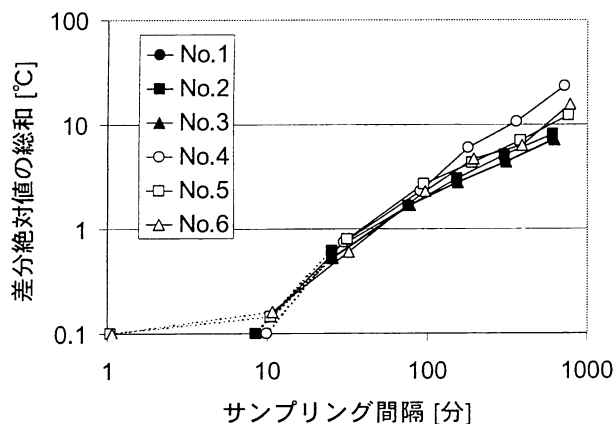


図-7 スペクトルの差分 (温度)

3. 短期的な変動に対するデータ処理方法

(1) データ処理方法の概要

自動計測により得られたリアルタイム計測データには、温度の日変化等に起因する短期的な変動が含まれている。一方、計測データを周波数分析して得たスペクトルのうち、周期が短い成分については、長期的な変動に影響しない成分だと考えられる。とくに、周期24時間に明瞭なピークが見られることから、これより周期の大きい成分を残すようなローパスフィルタをかけることによって短期的な成分を除去することを試みた。

ここでは、まず、2と同様の手法でフーリエ変換を行い、周期7日より短い成分を除去するようなフィルタをかけた後、フーリエ逆変換をすることにより処理後の波形を算出した。

(2) データ処理結果

ひび割れ幅に計測データについて、データ処理を行った結果を図-8に示す。また、No.1およびNo.2のひび割れ幅の計測データについて、20日分のデータを取り出して処理前後のデータを比較したものを図-9に示す。これより、処理前のデータには温度の日変化等に起因する短期的な変動が含まれているが、処理後のデータにはこれが除去されていることが確認できる。

以上のように、自動計測により得られたリアルタイム計測データにローパスフィルタをかけることにより、温度の日変化等に起因する変動や誤差が除去できることが確認できた。なお、処理後の波形には、周期7日の正弦波の影響が現れている。これについては、周期7日より周期が短い成分を全てカットするようなフィルタをかけていることによる影響であると考えられる。

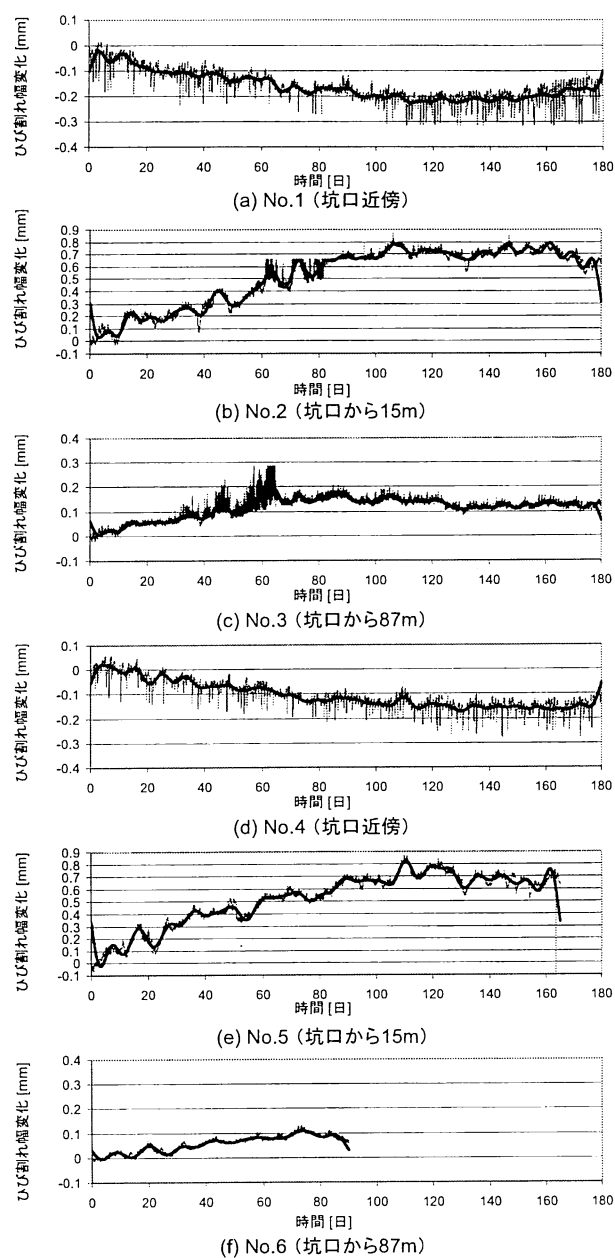


図-8 データ処理結果 (ひび割れ幅)

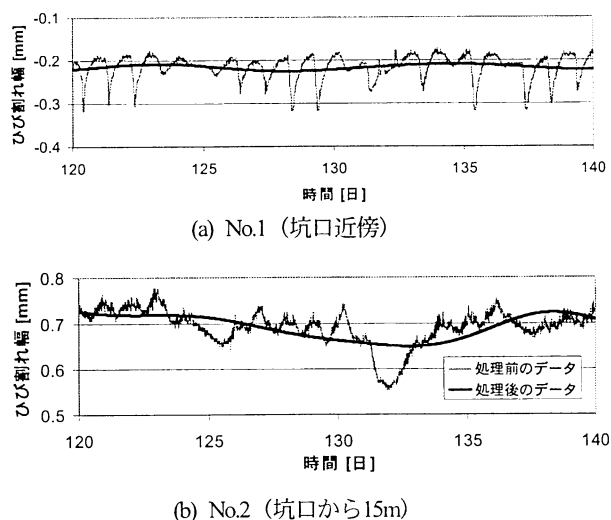


図-9 データ処理結果の拡大図 (No.1, ひび割れ幅)

を行いたいと考えている。

4. おわりに

トンネルの変状監視に自動計測を用いた場合膨大な計測データが蓄積されるが、このリアルタイム計測データを有効に活用することを目的として検討を行った。本研究で得られた結果を以下に示す。

- ・鉄道単線トンネルにおけるひび割れ幅および温度の計測データを周波数分析することにより、周期24時間に温度の日変化に関連すると想定される明瞭なピークがあることが確認できた。
- ・サンプリング間隔の異なるデータを周波数分析し、長い周期の成分を比較することにより、サンプリング間隔が長期変状傾向に及ぼす影響が定量的に検討できる可能性があることを把握した。
- ・自動計測により得られたリアルタイム計測データにローパスフィルタをかけることにより、温度の日変化等に起因する変動や誤差が除去できることが確認できた。

なお、今回最大180日分のデータを分析したが、今後データを継続して取得し、長い周期の成分に着目した分析

参考文献

- 1) 北川修三, 小幡利男: 青函トンネル海底部の維持管理, トンネルと地下, Vol.21, No.5, pp.59-64, 1990.
- 2) 土谷幸彦, 倉川哲志, 工藤健, 小西真治, 小島芳之, 東畑郁生: 海底トンネルの覆工の長期挙動と評価に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.3, pp.825-834, 2007.
- 3) 津野究, 蒲地秀矢, 中西祐介, 仲山貴司: 無線センサを活用したトンネル変状監視システムの開発, トンネル工学報告集, Vol.19, pp.245-249, 2009.
- 4) P. J. Bennett, K. Soga, I.J.Wassell, P. Fidler, K. Abe, Y. Kobayashi, M. Vanicek; Wireless Sensor Networks for Underground Railway Applications; Case studies in Prague and London, Smart Structures and Systems, Vol.6, No.5-6, pp.619-639, 2010.
- 5) 舟橋孝仁, 津野究, 蒲地秀矢, 伊藤富英, 福司淳一, 中西祐介: 無線センサを活用したトンネル変状監視システムの実トンネルへの適用, 第 65 回年次学術講演会講演概要集, VI-449, 2010.

INVESTIGATION OF PROCESSING METHOD OF REAL-TIME DATA OBTAINED BY TUNNEL-DISTORTION MONITORING

Kiwamu TSUNO, Hideya KAMACHI and Takahito FUNAHASHI

To utilize the real-time monitoring data to the maintenance of distorted tunnels, this paper proposes the data processing method which eliminates the short-term change caused by daily temperature change. The monitoring data obtained at a railway tunnel with wireless sensors were analyzed by Fourier transformation to know the characteristics of spectrum. The influence of sampling interval was discussed by comparing the spectrum of data with different sampling interval. It is also found that low-pass filter is effective tool to eliminate the short-time change.