

# 斜張橋ケーブルの振動モニタリングデータの活用手法について

加辺 圭太郎\*・春日井 康夫\*\*・梅坂 清嗣\*\*\*・早田 泰子\*\*\*\*

\* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員

\*\* (一財) 沿岸技術研究センター 専務理事

\*\*\* 前 国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所技術開発課 技術開発課長

\*\*\*\* 国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所技術開発課 技術開発係長

臨港道路東西線の一部である新湊大橋（5径間連続複合斜張橋）では、建設途中から渦励振による鋼桁振動やレインパイブレーションによるケーブル振動などが観測された。そのため、種々の耐風対策が講じられるとともにモニタリングシステムを構築し、常時観測とモニタリングデータの蓄積を行っている。本稿では、得られたモニタリングデータから強風時におけるケーブル制振対策工の効果検証や、平常時における健全状態の指標について検討を行ったものを報告する。

キーワード：橋梁，臨港道路，モニタリング，固有振動数

## 1. はじめに

伏木富山港新湊地区にある臨港道路富山新港東西線は、新湊地区の東西地域を結ぶ延長約3,600mの橋である。港口部の航路を跨ぐ主橋梁部（以下、新湊大橋と称する）の構造は、延長約600m主径間360mで、主径間を鋼桁、側径間をPC桁で構築された5径間連続複合斜張橋である。新湊大橋は、建設途中から渦励振による鋼桁振動及びレインパイブレーションによるケーブル振動が観測されており、種々の耐風対策が講じられ

てきた。鋼桁については、流動板（フラップ）による対策を実施後、振幅が抑制されたことから耐風対策は完了したと判断された。ケーブルについては、高減衰ゴムの容量を増やすなどの対策をしてきたが、その後も損傷を伴うようなケーブル振動が確認されたため、制振性能をより向上させる粘性せん断ダンパーによるケーブルの制振対策が実施されるとともにモニタリングシステムが構築された<sup>1)</sup>。

本稿では、新湊大橋で構築されたモニタリングシステムより得られたモニタリングデータを活用して制振

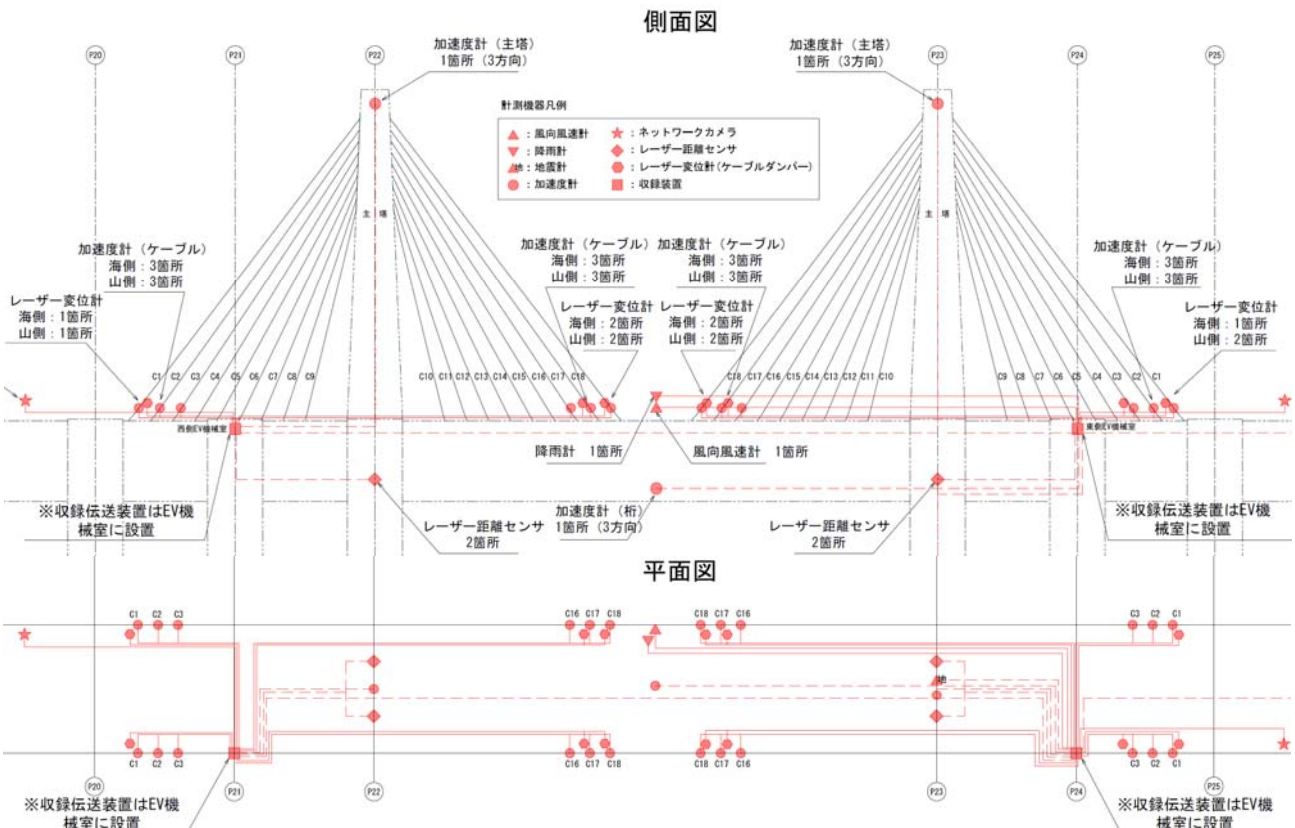


図-1 新湊大橋におけるモニタリング計器配置概略図

対策工の効果の検証と平常時のモニタリングデータの解析と活用手法についての検討結果について報告するものである<sup>2)</sup>。

## 2. モニタリングデータの仕様

モニタリングの計測箇所は、加速度計による加速度を各ケーブルC1～3, C16～18, 主塔P22, P23及び桁で計測している。レーザー変位計による変位を粘性せん断ダンパーが設置されているC1, C17, 18で計測している。レーザー距離センサーによる変位を主塔P22, 23の支承で計測している。その他に風向風速計, 降雨計, 地震計による計測とネットワークカメラによる画像監視を行っている。なお, 計測データは, 連続観測されておりデータベース上に保存されている(図-1)。

## 3. 制振対策工の効果の検証

### 3.1 検証条件の整理

ケーブル制振対策として設置された粘性せん断ダンパーの効果について検証するにあたり, 平成23年度から平成26年度にかけて確認されたケーブル振動時の振動発動条件について整理した。発動条件としては, 3つの風向に分けて整理すると 1) 風向が北北東～東北東, 平均風速 10～25m/s, 2) 風向が西南西～南南西, 平均風速 10～15m/s, 3) 風向が北, 平均風速 10～17m/s となった。なお, 橋軸方向は西から14度北よりである。

### 3.2 モニタリングデータの整理

気象データは, 気象庁伏木観測所での観測記録を用いた。また, データ抽出は, 強風時と耐風時に分けて行った。データ抽出の対象期間は, モニタリングシステム運用開始の2017年4月からとした。期間内で対象となるデータの中から強風時の代表的なデータとして風向が北(2データ), 北北東(2データ), 南南西(2データ)の計6データと, 台風時の代表的なデータとして風向が北東(3データ), 北北東(1データ)の計4データを抽出した(表-1)。

表-1 分析データ一覧

年月日時	風速(m/s)		風向	降水量(mm/hr)		気温(°C)
	モニタリングデータ	気象庁		モニタリングデータ	気象庁	
①2017/11/30 2:00	10.7	11.0	北北東	2.14	0	9.1
②2017/12/1 0:00	13.2	12.5	北北東	0.48	0	7.4
③2017/12/5 14:00	13.4	13.0	南南西	0.56	1	5.3
④2017/12/5 15:00	16.1	14.5	南南西	0.55	0	4.5
⑤2017/12/8 15:00	17.8	13.2	北	0.57	2	4.2
⑥2017/12/8 17:00	15.0	13.0	北	0.72	0	3.8
⑦2017/10/22 13:00	18.1	13.3	北東	5.28	3	19
⑧2017/10/22 15:00	19.6	16.5	北北東	0.43	3.5	19.1
⑨2017/10/22 16:00	22.4	20.3	北東	0.41	4.5	18.8
⑩2017/10/22 21:00	28.8	24.4	北東	0.43	2.5	18.5

強風時  
台風時

### 3.3 強風時の分析結果

#### (1) 変位の観測値による比較

粘性せん断ダンパーC1, C17, C18に設置しているレーザー変位計による変位の観測値データを比較した。代表データにおける粘性せん断ダンパーの変位はいずれも4mm以内であり, 粘性せん断ダンパーが許容している変位5mmより小さい値であった。

#### (2) ケーブルの振動の腹における変位の算出

モニタリングデータより得られた粘性せん断ダンパーの変位は許容変位未満となっており, 許容値を超えるような変位は生じていない。しかし, ケーブルの振動の腹における変位については直接計測されておらず画像による確認も行われていないことから, 粘性せん断ダンパー位置のケーブル変位や加速度計位置のケーブル加速度(図-2)を基に, C18ケーブルに着目して振動の腹における変位を算出した。

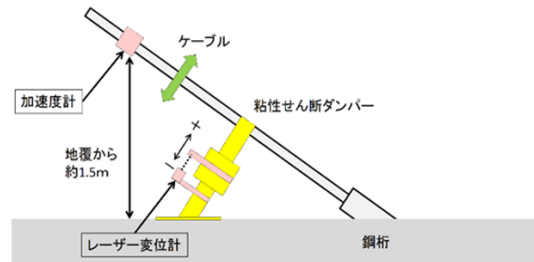


図-2 変位計及び加速度計の位置関係

粘性せん断ダンパー位置のケーブル変位を基にしたケーブル振動の腹における変位の算出は, ケーブルの振動波形をsin波形, 固定点をケーブルの定着点として, ケーブル長とダンパー位置およびダンパー位置における変位の関係から振動の腹での変位を算出した(図-3)。算出結果は, 1次モードにおいて強風時(風速13.2m/s 2017年11月30日～12月1日0時00分)で最大変位8mm程度, 台風時(風速28.8m/s 2017年10月22日20時50分～21時00分)で最大変位40mm程度であった。

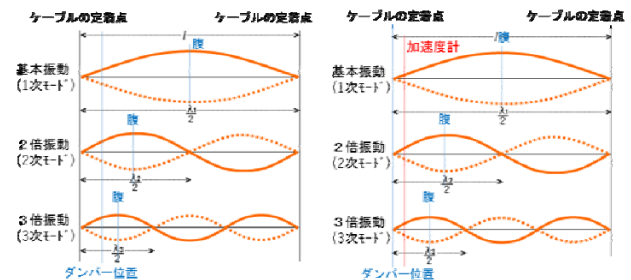


図-3 粘性せん断ダンパーの変位を基にしたケーブル振動波形(左)及び加速度計位置でのケーブル加速度を基にしたケーブル振動波形(右)

加速度計位置におけるケーブル加速度に基づくケーブル振動の腹の変位の算出は, ケーブル加速度から加速度計位置における変位を算出後, ケーブル振動波形をsin波形, 固定点をダンパー位置とし, ケーブル長, ダンパー位置, 加速度計位置及び加速度計位置における変

位の関係から振動の腹での変位を算出した(図-3)。

算出結果は、1次モードにおいて強風時で最大変位40mm程度、台風時で最大変位43mm程度であった。これに固定点のダンパー位置の変位を加えたとしても45mm程度であった。上記2つの仮定に基づく振動の腹での変位は、これまでに目測で観測されたケーブル振動時の変位(片振幅200~250mm)に比べて小さく、粘性せん断ダンパーの許容変位から算出した変位(片振幅50mm)よりも小さいことから、モニタリング実施期間内の気象条件においては、粘性せん断ダンパーによる制振効果が認められる結果が得られた。

#### 4. 平常時のモニタリングデータの解析と

##### 活用手法の検討

##### 4.1 平常時のモニタリング

新湊大橋は供用後5年程度と経年変化に関しては健全状態であると考えられる。今後の異常値検出の基礎資料とするため、平常時のモニタリングデータの解析を実施した。データ解析では、抽出した加速度及び変位の時刻歴データから固有振動数を算出するために高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform, 以下FFT)による手法を用いた(図-4)。

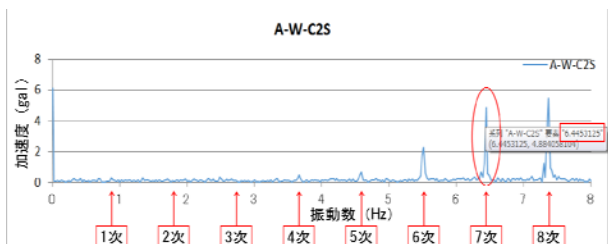


図-4 ケーブル加速度の時刻歴データからFFTによる固有振動数算出事例

なお、平常時とは橋梁設計における常時(死荷重等の永続作用及び活荷重や温度変化の変動作用が支配的な状況であり風荷重や地震の影響が支配的でない状況)と称される荷重状態にあたる状況とする。

##### 4.2 分析対象データの抽出

平常時においても、活荷重や温度変化の影響は時々刻々変化することから、これらを踏まえて分析対象のデータを抽出した。このほか、ケーブルに関してはこれまでの振動発生状況から風速にも留意した。

以上のことから、次のとおり分析対象を抽出した。1) 活荷重の変動の影響については、交通量が比較的多い時間帯、交通量が比較的小さい時間帯、どちらでもない時間帯の各3データずつ計9データを抽出した。なお、温度変化の影響を排除するため気温が同程度のものを抽出した。2) 温度変化の影響については、気温が高い(25℃以上)、設計標準温度に近い(20℃)、気温

が低い(5℃以下)の各3データずつ計9データを抽出した。なお、活荷重の影響を排除するため平日昼間の時間帯を抽出した。3) 風の影響については、風速が10m/s未満を5データ、風速が10m/s以上30m/s未満を3データ、風速が30m/s以上を2データの計10データを抽出した。

##### 4.3 データ抽出条件ごとの結果

###### (1) 活荷重(交通量)の変動の影響

活荷重を変動させた場合における加速度や変位等の観測値の整理結果より、活荷重の変動による影響は見られない(図-5)。また、加速度及び変位のFFT結果では、活荷重が増大するとケーブル張力が増し固有振動数が高くなるというような傾向は、一部見られるものの、全体として見るとばらつきが大きく、明確な傾向は見られない(図-6)。観測した固有振動数の設計時に対する比率は、100~106%の変動幅であった。

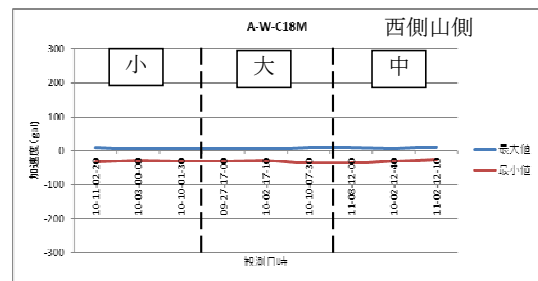


図-5 活荷重条件によるケーブル加速度への影響

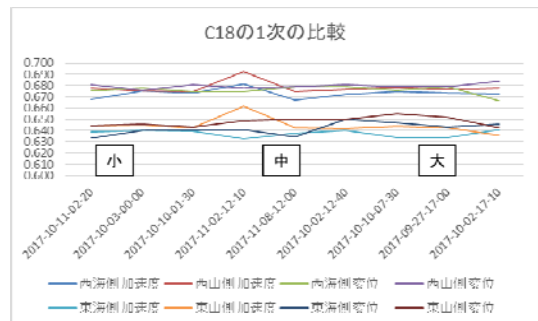


図-6 活荷重条件による加速度及び変位のFFT結果への影響

###### (2) 温度変化の影響

温度条件を変化させた場合における加速度や変位等の観測値の整理結果より、温度変化による影響は見られない(図-7)。

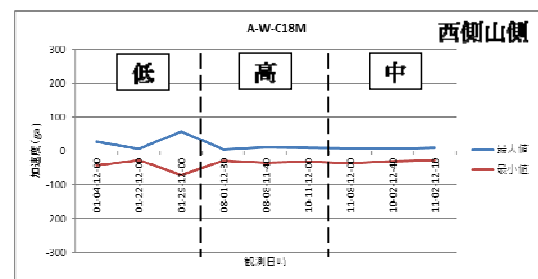


図-7 温度条件によるケーブル加速度への影響

また、加速度計及び変位の FFT 結果では、温度が上昇するとケーブル張力が小さくなり固有振動数が小さくなるという傾向は一部見られるものの、全体として見るとばらつきが大きく、明確な傾向は見られない(図-8)。観測した固有振動数の設計時に対する比率は、100~106%の変動幅であった。

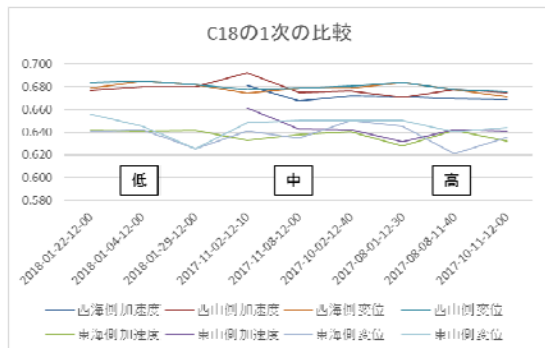


図-8 温度条件による加速度及び変位のFFT結果への影響

### (3) 風の影響

風条件を変化させた場合における加速度や変位等の観測値の整理結果より、ケーブルでは風速 10m/s 以上か未満かで加速度が大きく異なる(図-9)。また、風速 30m/s 以上で変位が 1 mm 以上となる(図-10)。

風条件を変化させた場合における加速度及び変位のFFT結果では、個別データではばらつきがあるものの、平均すると風速が大きくなると固有振動数が大きくなる傾向が確認できる。観測した固有振動数の設計時に対する比率は、100%~105%の変動幅であった。

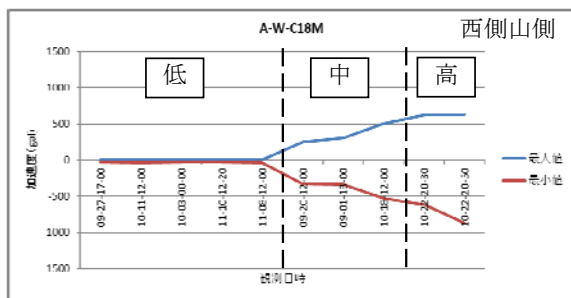


図-9 風条件によるケーブル加速度への影響

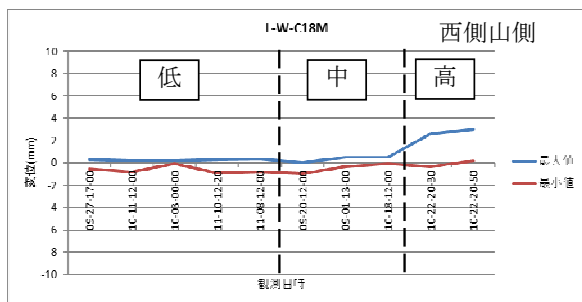


図-10 風条件による粘性せん断ダンパー位置での変位への影響

## 4.4 ケーブル固有振動数の閾値の検討

データ抽出条件ごとの結果を踏まえて、異常値検出の指標としてケーブル固有振動数の閾値の検討をした。活荷重、温度、風がケーブル固有振動数に及ぼす影響は、設計時のケーブル固有振動数に対して 103%±3% の範囲であった(表-2)。計測誤差も考慮して、当面は 103%±5% を異常値検出の閾値とすることが適当とした。なお、設計値の 108% まで許容した場合であってもケーブルの当初設計時の設計張力より算出した固有振動数の範囲内のため、直ちに対応が必要になるような損傷が発生したとは考え難いが、想定した影響要因以外の要因で変化が生じている可能性も考えられるので、点検を実施し、ケーブル状況を確認する必要があるとした。

表-2 観測値から算出した固有振動数および張力の設計時の固有振動数および張力との比較

	固有振動数		張力	
	変動幅	平均値	変動幅	平均値
活荷重変動	100~106%	103%	101~112%	106%
温度変化	100~106%	103%	100~112%	106%
風速変化	100~105%	103%	99~110%	106%

## 5. おわりに

本稿は、モニタリングデータの活用手法として強風時におけるケーブル制振対策工の効果検証や、平常時における健全状態の指標の検討結果について報告した。ケーブル制振対策工の効果は、今回の対象範囲内においては概ね制振効果があると考えられる結果が得られた。平常時における健全状態の指標となる閾値についても一定の値を得ることができた。引き続きモニタリングデータを取得し、継続した解析を行うことで、制振効果の更なる検証と健全状態の指標の精度向上に寄与することを期待する。

## 謝辞

本稿は、国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所発注の港湾施設の設計等に関する技術支援業務の成果の一部を報告したものである。

検討にあたっては、臨港道路東西線におけるモニタリングデータ活用手法にかかる検討会(座長:長岡技術科学大学 長井名誉教授)の各委員、北陸地方整備局の関係者から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所:平成27年度伏木富山港(新湊地区)臨港道路東西線点検等設備細部設計報告書,平成28年3月
- 2) 国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所:港湾施設の設計等に関する技術支援業務報告書,平成30年3月