

高次振動法による PC 外ケーブルの張力測定

河村 睦^{*1}・奥村 敏弘^{*2}・細居 清剛^{*3}・堀井 智紀^{*4}

老朽化した橋梁数が増加し、橋梁の維持管理の負担軽減への期待が高まっている。維持管理の一手法として橋梁用 PC 外ケーブルや斜張橋斜材などの張力測定において、従来の測定技術とは異なりキャリブレーションが不要でケーブルの張力と曲げ剛性を同時に求めることができる新しい振動法（以下、高次振動法と称す）について紹介する。

キーワード：振動法、ケーブル張力、点検、維持管理

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PC と称す）を用いた構造物や吊橋や斜張橋などの吊構造物などにおいては、施工時にケーブルに所定の設計張力が導入されているかどうかを十分に確認しておく必要がある。

一方、高度成長期に建設された土木構造物の老朽化が進み、維持管理および更新の需要が大幅に増加することが予想され、維持管理実務者の負担軽減、財政的な制約などを考慮し、簡便で迅速に実施できる維持管理手法が必要とされている。

そこで、本稿では構造物の変状を把握する一手段として高次振動法による PC 外ケーブルの張力測定例および維持管理への活用法について紹介する。

2. 張力測定の現状

近年、ケーブル張力の測定方法としては磁歪法やケーブルの曲げ振動方程式から導いた振動法の実用式などが知られている。

しかしながら、磁歪法による張力測定では事前キャリブレーションが必要であることに加え、測定箇所それぞれに恒久的に測定器を設置する必要がある。また、従来の振動法ではケーブルの曲げ剛性値を事前に対象ケーブルの実大試験などで測定する必要がある。曲げ剛性値は張力状態や

境界状態によって異なるため、現地のケーブル張力測定時のすべての状況を想定して、事前試験を行うことは困難であり、事前試験と現地試験とで条件が異なることに起因して、張力算定誤差が生じる可能性がある。

上記の問題を解決するために、複数の高次の固有振動数とモード次数の関係式から直接、張力と曲げ剛性を同時に求める新しい高次振動法が提案されており既往の試験で吊橋や斜張橋などの吊構造物では十分な精度を有していることが確認されている。

3. 高次振動法

橋梁ケーブルのように張力のかかった一次元部材のたわみに関する運動方程式を両端単純支持の境界条件のもとに解くと振動方程式からモード次数 i とその固有振動数 f_i との間に次の関係式が得られる。

$$f_i^2 = \frac{\pi^2 EI}{4 \rho A L^4} i^4 + \frac{T}{4 \rho A L^2} i^2 \quad (1)$$

ここで、 EI ：曲げ剛性（N/m²）

T ：張力（N）

ρ ：密度（kg/m³）

A ：断面積（m²）

L ：ケーブル長（m）

式(1)は i に関する多項式となっており、測定で得られた高次の固有振動数とモード次数の関係より最小二乗法で



^{*1} Akira KAWAMURA

神鋼鋼線工業(株)
開発部 加工品開発室



^{*2} Toshihiro OKUMURA

大成建設(株)
横浜支店



^{*3} Kiyotaka HOSOI

神鋼鋼線工業(株)
技術部 PC鋼線技術室



^{*4} Tomonori HORII

神鋼鋼線工業(株)
技術部 PC鋼線技術室

i の 4 乗の項の係数から曲げ剛性 EI , i の 2 乗の項の係数から張力 T を同時に求めることができる。図 - 1 に固有振動数とモード次数の関係を示す。本方法によれば事前の曲げ剛性の測定は不要であり、既設構造物のケーブル張力も容易に測定することができる。

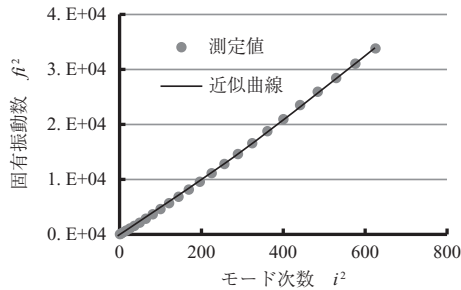


図 - 1 固有振動数とモード次数の関係

図 - 2 はケーブルをハンマーなどで加振した場合のケーブル振動の周波数応答の例である。また本方法と従来の方法を比較した結果を表 - 1 に示す。

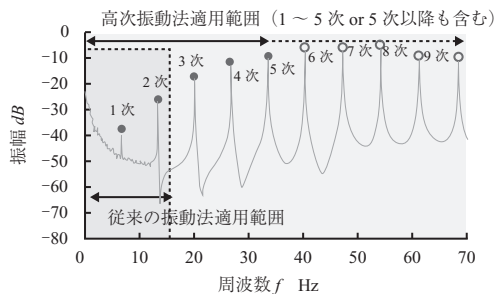


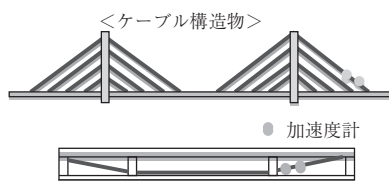
図 - 2 ケーブル振動の周波数応答例

表 - 1 従来の振動法と高次振動法の比較

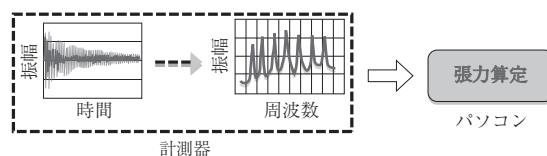
	従来の振動法	高次振動法
算定式	振動方程式から導いた固有振動数と次数の簡易式	振動方程式から導いた固有振動数と次数の解析式
固有振動数	1 次または 2 次の単独の固有振動数を周波数分析結果から判断	高次までにわたる規則性のある複数の固有振動数を使用
曲げ剛性	事前評価が必要で実物大での事前試験、あるいは実橋での事前試験を実施	張力と同時に算定、事前評価は不要
本方法による改善点	固有振動数の規則性から、固有振動数の判別が容易であり、ノイズ周波数の選定が簡単である。設置された状態で曲げ剛性、張力を算定するため測定誤差が小さい	

4. 測定方法

これまで、高次振動法の概要を述べてきたが、具体的な



加速度計取付 → ケーブル長計測



→ 振動波形収録 → データ分析 → 張力算出

図 - 3 測定フロー

測定方法について測定フローおよび実橋での測定例を基に以下に説明する。

4.1 測定手順

高次振動法の測定フローを図 - 3 に、測定システム例を図 - 4 に示す。1 回の計測に要する時間は約 15 分である。

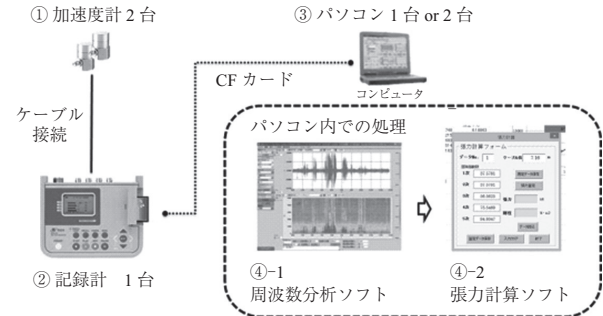


図 - 4 測定システム例

4.2 加速度計取付

加速度計はケーブル定着点から $L/5$ (L : ケーブル長) 以内の位置に 2 個取り付ける。振動計測点を 2 点設ける理由は、図 - 5 のとおり振動モードの節位置とセンサー位置とが合致し、固有振動数のピークが消失することを避けるためである。

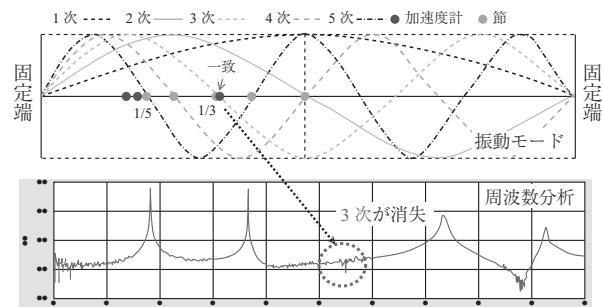


図 - 5 計測点と振動モードの関係

加速度計は写真 - 1 に示すようにケーブルにホースバンドを取り付け、磁石を介して加速度計を固定する。なお現場組立式ケーブル (ECF マルチストランドなど) についてもゴム板を挟む形でケーブルを傷つけないようにケーブルを一体化させることで振動波形を測定することが可能である。

4.3 ケーブル長計測

張力算定に用いるケーブル長は、各測定区間において偏向部とケーブルが接している点までの長さを計測し、偏向

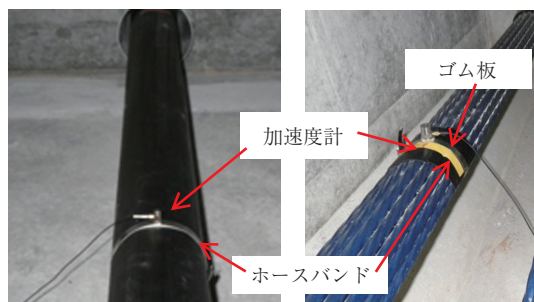


写真 - 1 加速度計取付状況

部間のケーブル支持長さとした（図 - 6）。

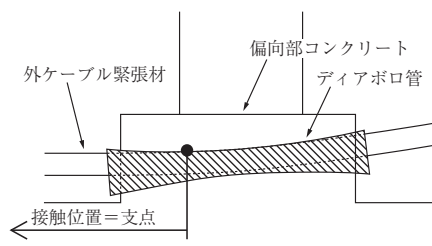


図 - 6 ケーブル長の設定

4.4 振動波形計測

写真 - 2 に示すように加速度計近傍においてケーブルをプラスチックハンマーで打撃することによって振動を与える。なお、供用後においては車両通行時の常時振動でも測定は可能である。



写真 - 2 ハンマー打撃加振

4.5 データ分析および張力算定

計測した振動波形から周波数分析ソフトを用いて高次に至るまでの複数の固有振動数を抽出する。1～5 次までの固有振動数のうち、判別不可能なものがある場合は 5 次以降も含めて 5 つ程度の固有振動数を用いて、張力を算出した方が測定精度が高まる。なお前述したように固有振動数には規則性が見られ、判別は容易である（図 - 7）。

ケーブル単位質量と計測したケーブル長、固有振動数から式 (1) を用いて張力を算定する。

5. 測定例

5.1 室内試験

(1) 試験方法

図 - 8 に示すように供試体（ $L \approx 10$ m）を引張試験機

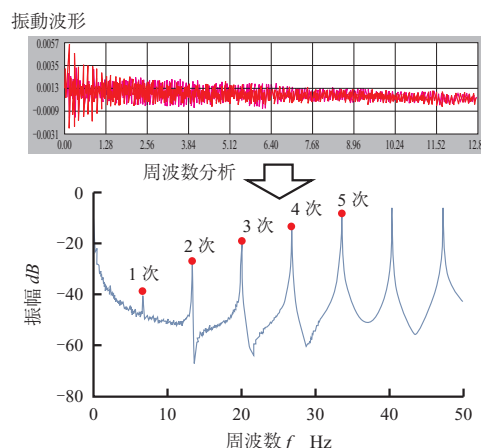


図 - 7 周波数分析

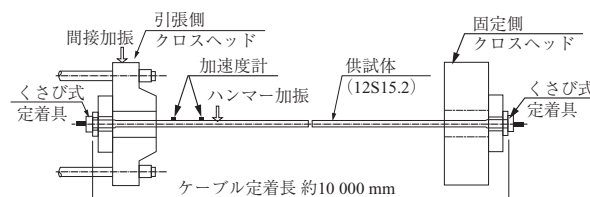


図 - 8 試験概要

で張力を与えた状態で加振し、振動波形の計測、周波数分析を行い、張力を算定した。試験条件を表 - 2 に示す。ケーブルの加振はハンマーによって打撃するのに加えて、車両通行時を模擬した常時振動としてクロスヘッド部を揺らすことで振動を与える間接加振についても測定を実施した。

表 - 2 試験条件

タイプ	12S15.2 (引張荷重 $P_u = 3\,132$ kN)	
ケーブル	セミプレファブ型 (亜鉛めっきマルチ)	現場組立型 (裸マルチ)
単位質量 kg/m	15.7	13.2
設定張力 kN	1000, 1300, 1600, 1900, 2200	2000

(2) 試験結果

図 - 9 に測定結果を示す。横軸は試験機荷重を縦軸は高次振動法による測定値を試験機荷重で除した値を百分率で示す。なお、測定値は境界条件を単純支持とみなして算出した。図 - 9 によれば試験機荷重が大きくなるにつれて、試験機荷重に対する測定値の割合が小さく見られたが、 $\pm 5\%$ 以内の算定精度を有していることが確認できた。また間接加振による測定、現場組立型ケーブルの測定も同様の測定精度を有することが確認できた。

5.2 実橋試験

(1) 測定概要

高次振動法の実橋での適用性を確認するために、紀北東道路重谷川高架橋（仮称）の桁内 PC 外ケーブルとして使用された表 - 3 に示すセミプレファブマルチケーブル（アンボンドマルチ）を用いて測定を実施した。

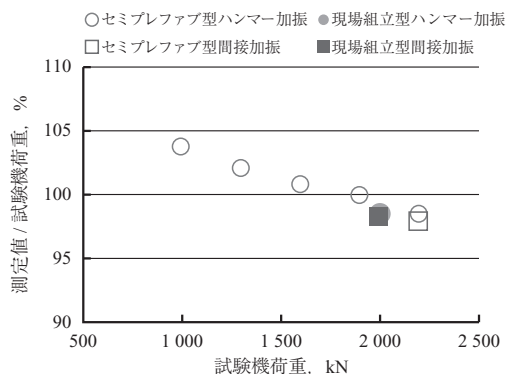


図 - 9 測定結果

表 - 3 ケーブル仕様

概要図		
	高密度ポリエチレン一括被覆 高密度ポリエチレン個別被覆 防錆グリース塗布 PC鋼より線	
タイプ	19S15.2 アンボンドマルチ	
引張荷重	4 959 kN	
単位質量	24.0 kg/m	

図 - 10 に橋梁全体図を、図 - 11 に測定位置を示す。測定は表 - 4 に示すとおり、中央径間に配置される 02, 03 ケーブルについては緊張作業時の各ステップおよび緊張完了から 3 か月経過した時点で測定し、側径間を含む 04 ケーブルについては全ケーブル緊張完了後に測定を実施した。

(2) 測定方法

各測定区間に 2 つの加速度計を取付け、所定荷重到達時に加速度計近傍をプラスチックハンマーで打撃加振し（写真 - 3）、振動波形の収録、周波数分析を実施し、2 次～6 次の固有振動数を用いケーブル張力を算出した。

表 - 4 測定条件

ケーブルNo	設定圧力
02L, R 03L, R	5, 10, 20, 30, 40, 45 MPa, 最終緊張圧, 定着直後 3 か月後
04L, R	全ケーブル緊張後



写真 - 3 計測状況

各測定区間のケーブル支持長さは、写真 - 4 に示すようにケーブルと偏向管の接触位置を計測して算出した。高次振動法で算定した張力 T_s は緊張管理結果（緊張荷重と伸びのデータ）を基に各測定区間において推定される張力 T_x との比率（ $= T_s/T_x \times 100$ ）で評価した。なお比較対象となる緊張荷重は油圧ジャッキの油圧を圧力変換器で計測し、算出した。

(3) 測定結果

図 - 12 に測定した振動波形の周波数分析結果を示す。図中の数字は固有振動数のモード次数を示している。この図に示すように各測定結果において、固有振動数が規則的に励起しており、モードの判別が容易であった。

図 - 13 に 02, 03 ケーブルにおける最終緊張荷重時および定着完了時の測定結果を示す。図中の数字は最終緊張時と定着完了時との差を示している。設計値に対して 5 % 以内の測定精度を有しており、定着前後において高次振動法の測定結果には差が生じておらず、測定区間は定着時の

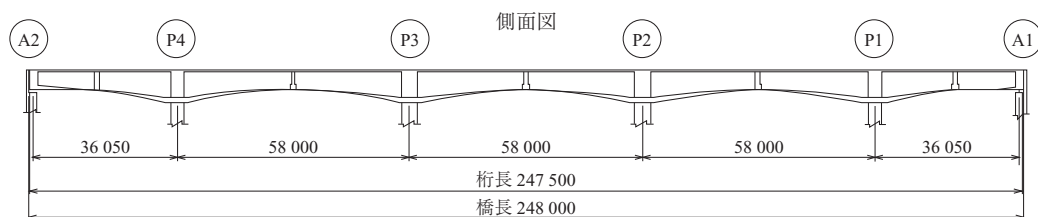
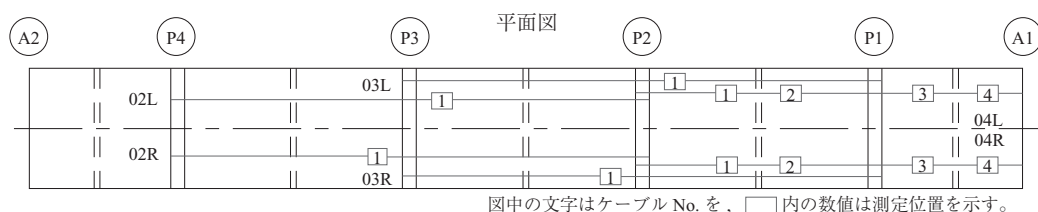


図 - 10 橋梁全体図

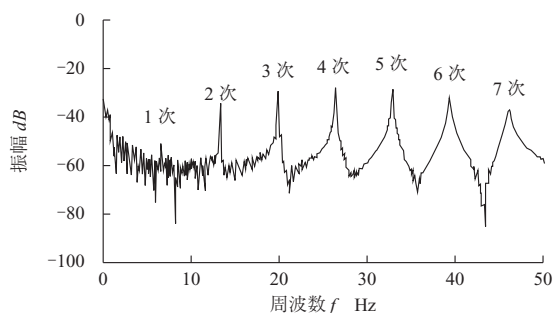


図中の文字はケーブル No. を、□ 内の数値は測定位置を示す。

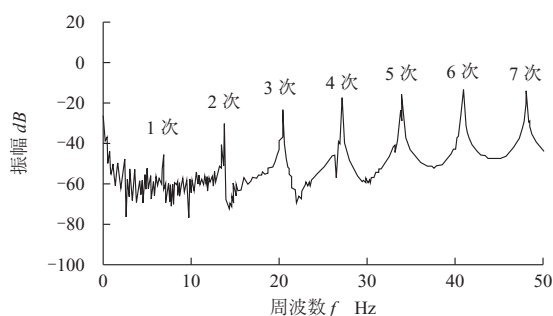
図 - 11 測定位置



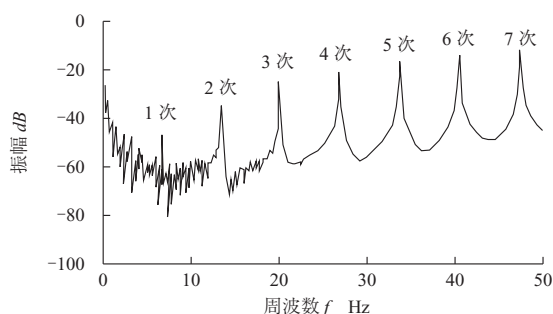
写真 - 4 ケーブル長測定



(a) 02L ケーブル, 定着直後



(b) 03L ケーブル, 定着直後



(c) 04L ケーブル, 全ケーブル緊張後

図 - 12 周波数分析結果

セットロスが生じない区間であることに合致していることが確認できた。

図 - 14 に 03L ケーブルの定着直後, 3 か月経過後の周波数分析結果を示す。各モード次数の固有振動数が低周波数側にシフトしており, 時間経過にともない荷重低下が生じていることが確認できた。

図 - 15 に 02, 03 ケーブルの 3 か月経過後に測定した

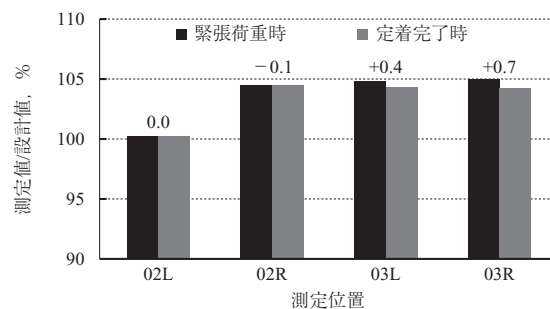


図 - 13 定着前後での測定結果

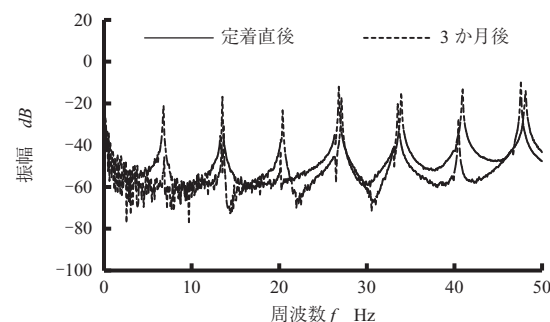


図 - 14 固有振動数の経時変化

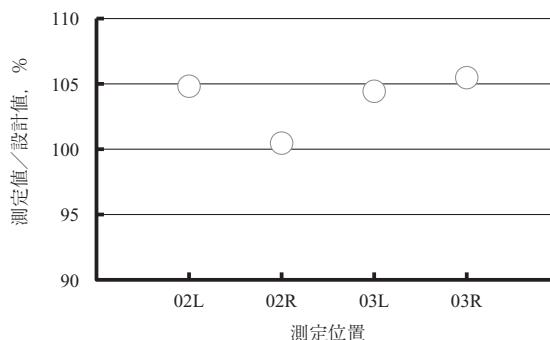


図 - 15 3 か月経過後の測定結果

結果を示す。横軸は測定ケーブルの位置を, 縦軸は高次振動法による測定値を設計値で除した値を百分率で示している。測定値は設計値に対して 100.5 % ~ 105.6 % の値と緊張完了時と比較すると少し高い値であった。これは設計値は緊張結果の推定値からコンクリートのクリープ, 乾燥収縮, PC 鋼材のリラクゼーションなどの荷重低下を引いた値であり, 荷重低下分が安全側, つまり高めに設定されていたためと考えられる。

図 - 16 に 04 ケーブルの測定結果を示す。横軸は測定位置を, 縦軸は高次振動法による測定値を推定値で除した値を百分率で示す。P2 に近い 3 区間については $\pm 5\%$ の測定精度であった。しかし, 04L ケーブルの A1 に近い区間においては設計値に対して測定精度 5 % を超える結果となった。

これは, 写真 - 5, 図 - 17 に示すように 04L ケーブルにおいて当初ケーブル支持点と設定したケーブルと偏向部の接触位置はケーブル偏向方向とは異なっており, 偏向管から受ける反力が小さく, ケーブル支持点とはみなせなか

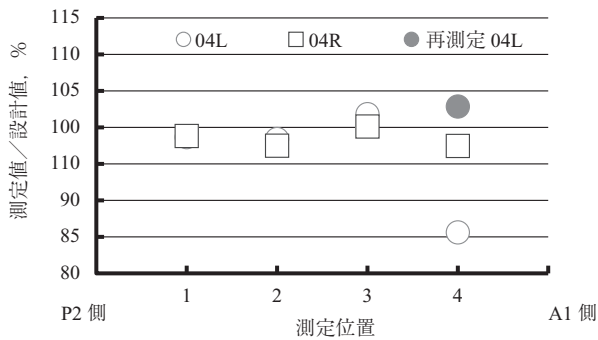


図 - 16 04 ケーブル測定結果



(a) 1 回目測定時

(b) 再測定時

写真 - 5 定着状況

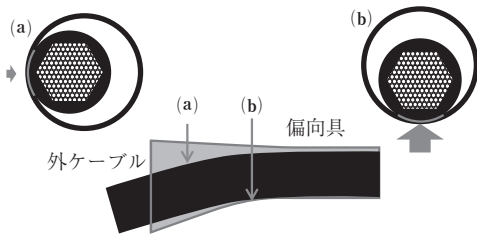


図 - 17 接触と反力状態

ったためと考えられる。ケーブル偏向方向の接触位置を支持点に設定して再測定を実施した結果、設計値に対して 105.1 % の結果を得た。

6. 高次振動法の活用法

高次振動法は、事前にケーブルの曲げ剛性を測定しておく必要がなく、ケーブル長およびケーブル質量さえ把握していれば、任意な点において簡便な装置で精度よく張力を測定することが可能である。

したがって、新設の構造物において緊張管理時の初期値の確認はもちろん、ケーブル曲げ剛性の情報を把握していない既設構造物のケーブル張力においても、ある測定日からの変化量を経時的に計測することで構造物の変状を把握する手段として有効活用できると考える (図 - 18)。

また、常時振動にて張力算定が可能であることより無線通信などを活用するシステムを構築することで計測データを転送し、遠隔地より構造物の変状をモニタリングすることが将来的には可能である (図 - 19)。

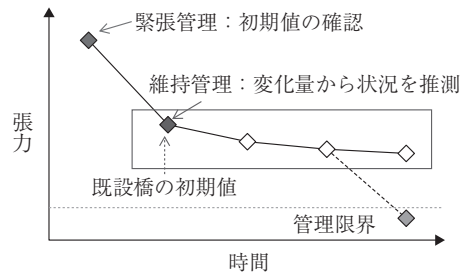
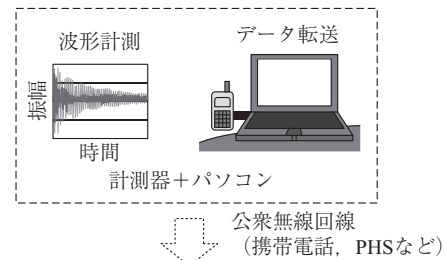


図 - 18 維持管理への適用

<モニタリング現場>



<管理事務所>

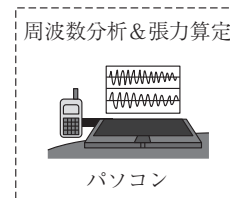


図 - 19 遠隔モニタリング例

7. おわりに

今回、高次振動法を桁内 PC 外ケーブルへの適用を試み、各種確認試験の結果、実用上問題のない測定精度で簡便に測定可能であることが確認できた。今後、緊張管理や定期点検など維持管理のニーズに応じた診断技術として検討頂ければ幸いです。

最後に各種試験を行うにあたり多くのご指導とご協力をいただきました関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 新家 徹, 広中邦汎, 頭井 洋, 西村春久: 振動法によるケーブル張力の实用算定式について, 土木学会論文報告集, 第 294 号 (1980) pp.25
- 2) 山極伊知郎, 宇津野秀夫, 菅野直樹, 杉井謙一: 振動法によるケーブル曲げ剛性と張力の同時推定法, 構造工学論文集, Vol.42A, 3, 1996, pp.547-554
- 3) 河村 睦, 山家芳大, 奥村敏弘, 山際伊知郎: PC 橋における張力測定への高次振動法の適用について, 第 22 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.359-362, 2013.10

【2014 年 8 月 28 日受付】