

裸使用された亜鉛めっき PWS を有する斜張橋形式歩道橋の 張力測定と振動同定

Measurement of tension and vibration in a cable-stayed pedestrian bridge with naked galvanizing PWS

龍田 齊*, 吉岡 勉**, 三浦 聡***

Hitoshi Tatsuta, Tsutomu Yohisoka, Satoshi Miura

*工修, 大日本コンサルタント(株), 保全エンジニアリング研究所 (〒170-0003 東京都豊島区駒込 3-23-1)

**工博, 大日本コンサルタント(株), 保全エンジニアリング研究所(〒170-0003 東京都豊島区駒込 3-23-1)

***工修, 大日本コンサルタント(株), 横浜支店(〒231-0013 神奈川県横浜市中区住吉町 2-24)

The method of calculating the cable tension from measured natural frequency was established and it became one of detailed inspection items in Honshu-Shikoku Bridge. However, there are few reports about measurement of existing cable by this method. Therefore, in this report, we measured tension of naked galvanizing and corroding PWS by vibration method in existing cable-stayed pedestrian bridge. Moreover, we measured vertical vibration in the entire bridge and evaluated vibrational usability regarding pedestrian bridge. As a result, there is not extreme decrease in each cable tension and first natural frequency in the entire bridge came out the frequency band that users revolt in passing bridge.

Key Words: cable tension, vibration method, PWS, vibration-mode detection

キーワード: ケーブル張力, 振動法, PWS, 振動モード同定

1. はじめに

2011年6月に発生した雪沢大橋(エクストラロード橋)のケーブル破断¹⁾に見られるように, 近年, 斜張橋や吊橋のケーブルにおける被覆材の亀裂や, 腐食による素線の破断など劣化損傷が顕在化している. これに対し, 計測したケーブルの固有振動数から張力を算定する方法が確立され, 本四架橋等では詳細点検項目の一つとなっているが, 経年使用されたケーブルに対する張力測定の報告は少ない.

そこで, 本検討では, 実際の斜張橋形式歩道橋において腐食が進行した裸使用亜鉛めっき PWS に対して, 張力抜けが著しいケーブルの検知を目的として振動法による張力測定を行った. ケーブルの健全性については, 建設時の張力管理値や設計張力の記録がなかったため, 測定結果を同諸元のケーブル同士で比較することにより状態の評価を行った.

また, 橋全体の鉛直振動を計測値からモード同定を実施し, 歩道橋として振動使用性の照査を併せて実施した.

2. 対象橋梁および計測方法

2.1 対象橋梁諸元

対象橋梁は昭和46年に建設された市町村道を跨ぐ歩行者専用の鋼斜張橋である. 対象橋梁の諸元を表-1に, 一般図を次項の図-1に示す.

表-1 橋梁緒元

項目	橋梁緒元
橋長	59.0m
支間割	27.00m+31.05m=58.50m
全幅員	4.2m
設計荷重	群集荷重
上部工形式	2 径間連続鋼斜張橋
下部工形式	橋台: 逆T式橋台 主塔: 鋼製門型形式
架設年次	昭和46年3月
適用基準	昭和40年横断歩道橋の設計指針
交差物件	市町村道

2.2 対象橋梁の損傷状況

本橋は全体的に塗装や舗装等の劣化が進行しており塗装の塗替え、舗装・防水層のやり直し等の補修対策が必要な状況にある。ケーブルについては部位別に損傷の特徴を以下に述べる。

(1) 主塔側定着部

写真-1 に示すように各ケーブルともにソケット内亜鉛の抜け出しも無く、素線部表面に発錆が認められる以外異常はない。

(2) 一般部

写真-2 に示すように各ケーブルとも上面部全長にわたり赤錆が発生しているが、ケーブル内面の発錆は無く、めっき表面に異常は無い。しかし、サンドペーパーで赤錆を除去すると、鉄地の一部は孔食が発生していた。

(3) 桁側定着部

写真-3 に示すように各部位中で一番錆の発生が進行しており、AIR (図-1 のケーブル番号を参照) については素線が断線していた。素線は破断面も赤錆が発生しており破断してから時間が経過していることが確認される。内部状況は異物、錆等が内部に入っており、湿潤状態が続き、錆が発生しやすい状況になっていた。



写真-2 ケーブル一般部



写真-1 ケーブル主塔側定着部



写真-3 ケーブル桁側定着部

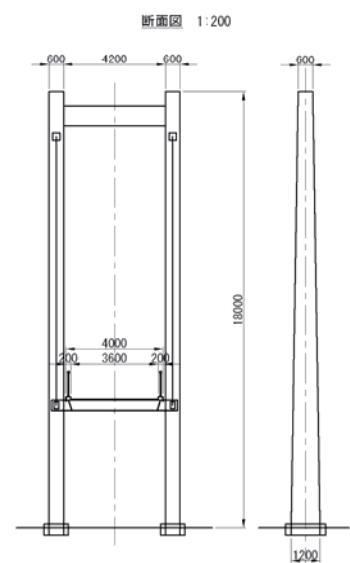
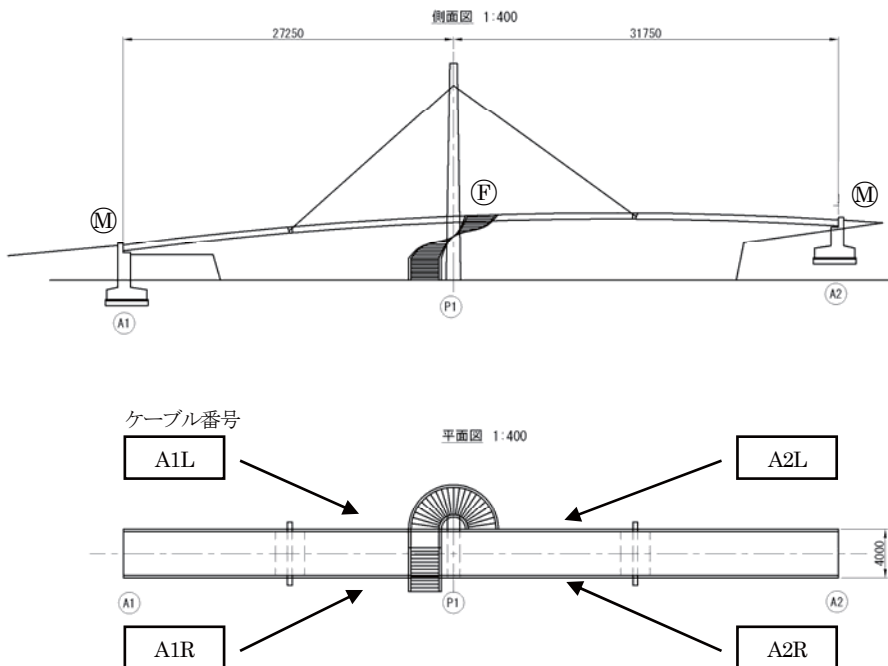


図-1 対象橋梁の一般図

2.3 計測方法

各主ケーブルの張力を把握するため、ケーブル内部の腐食状況を確認した上で固有振動数を測定した。また、斜張橋の全体振動も併せて計測した。

(1) センサー配置

ケーブルについては、各ケーブルに単軸加速度センサーを3チャンネル(以降 Ch と呼称)配置した。モードの節によるピーク逃しを避けるために、Ch1 と Ch2 の2点に配置した。Ch3 は歩行者による振動が計測に影響を与えていないか確認するために橋面付近に配置した。

橋面全体の振動計測については、各支間 1/2 点の左右に単軸加速度センサーを鉛直方向に設置し、4 点の同期計測を行った。センサーの配置位置を図-2 に示す。

(2) 加振方法

ケーブルについては、手加振を各ケーブルで2回実施した。橋全体の振動計測については人力加振(A1 から A2 へ走行)を2回実施した。計測時のサンプリング周波数は200Hzとした。

3. ケーブル張力の算定

3.1 ケーブル張力の算定方法

振動法によるケーブル張力の算定は、大別して、新家の研究¹⁾による実用算定式法と、宇津野らの研究²⁾によるカーブフィッティング法がある。前者は、ケーブル諸元と計測した固有振動数から直ちに張力 T を求めることができる簡便な方法であるが、事前試験によりケーブルの曲げ剛性 EI を測定しておく必要がある。

後者は、計測した固有振動数の2乗プロット図のカーブフィッティングから、ケーブル張力 T と曲げ剛性 EI を同時に算定できる方法であるが、高次モードの固有振動数を計測から同定しておく必要がある。本計測では、曲げ剛性に関する既存データがなく、且つ、裸使用された PWS で断面諸元からの推定が困難であったため、カーブフィッティング法による張力算定を用いた。

カーブフィッティング法による張力 T と曲げ剛性導出手順について述べる。ケーブルのように軸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、境界条件をもとに振動数方程式に展開して解くと、両端単純支持の場合は関係式(1)が、両端完全固定の場合は関係式(2a),(2b)が得られる。

$$f_n^2 = \frac{\pi^2 EI}{4\rho AL^4} n^4 + \frac{T}{4\rho AL^2} n^2 \quad (1)$$

$$f_n^2 = \frac{\pi^2 EI}{4\rho AL^4} \left(n - \frac{\phi}{\pi} \right)^4 + \frac{T}{4\rho AL^2} \left(n - \frac{\phi}{\pi} \right)^2 \quad (2a)$$

$$\tan \phi = -\frac{2\omega}{T} \sqrt{\rho AEI} \quad (2b)$$

固有振動数とモード次数の2乗プロット図に対しカーブフィッティングを行い式(1)の曲げ剛性項と張力項の係数を初期値として算出する。次に、式(2b)より ϕ の初期値を算出し、式(2a)の $(n - \phi/\pi)$ の項に代入して、カーブフィッティングにより2回目の T と EI を算出する。式(2b)と式(2a)の計算を T と EI が収束するまで繰り返した際の、T と EI を同定値とする。

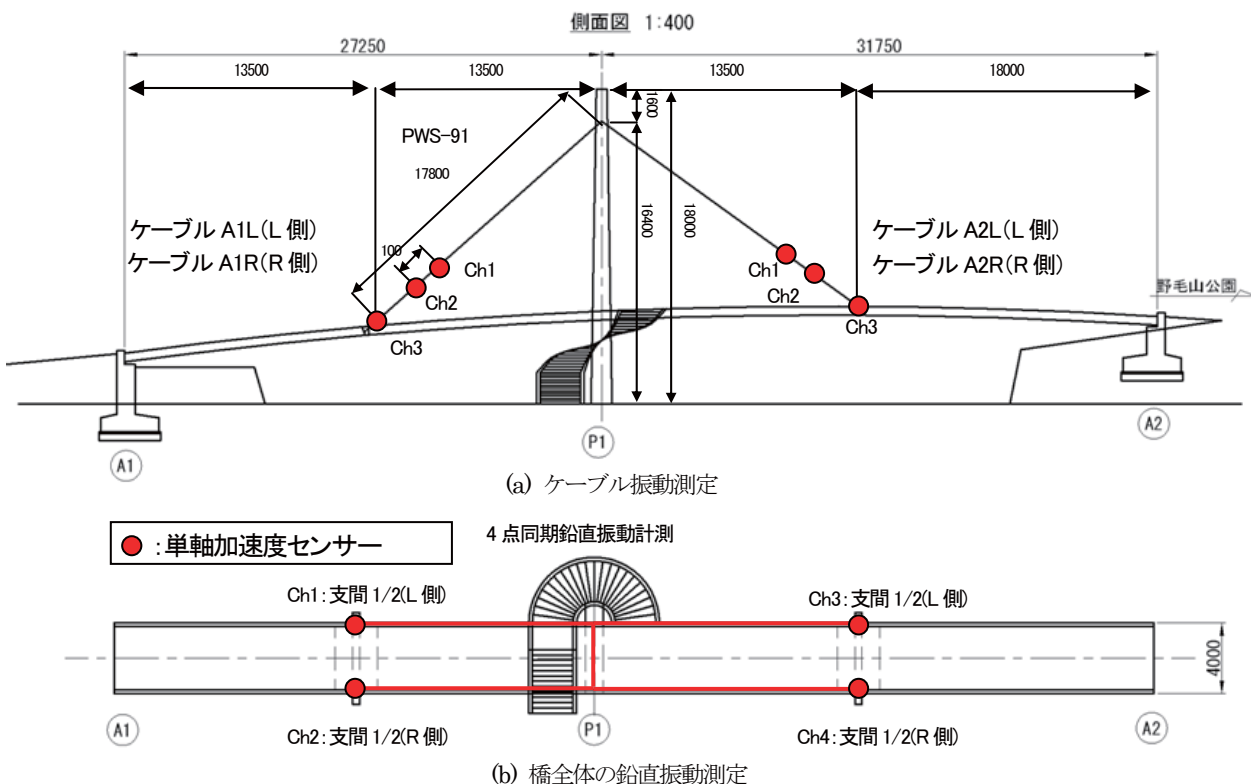
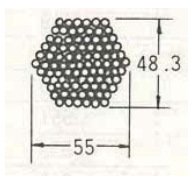


図-2 加速度センサーの設置位置

3.2 ケーブル諸元

ケーブル諸元は設計構造図より「PWS-91」として整理したものを表-2に示す。

表-2 ケーブル諸元

項目	値
種類	PWS-91
ワイヤ本数	91
形状および寸法(mm)	
断面積(mm ²)	1,790
ケーブル長(mm)	17,800
破断荷重(kN)	2810
質量(kg/m)	14.0

3.3 ケーブルの固有振動数

人力加振による各ケーブルの加速度波形から 40.96 秒(8192 点)抽出し、高速フーリエ変換(FFT)からピーク周波数を求めた(表-3)。各ケーブルの3行目は1回目と2回目の振動数の比である。表から各ケーブルの1回目・2回目の計測にばらつきが少ないことがわかる。したがって1回目の計測値を用いて張力を算出した。各ケーブル1回目の計測における波形図及びFFT結果のパワースペクトル図を図-3に示す。なお、加速度波形の赤枠部分はFFTの対象とした区間である。手加振による強制振動が終わった、減衰振動の区間をサンプリングした。図-4は各ケーブルのパワースペクトル図をすべて重ねて比較したものである。図から対角のケーブル間で卓越振動数が比較的近似していることが確認できる。

表-3 各ケーブルの固有振動数

ケーブル名	計測回数	振動数計測値(Hz)		
		1次	2次	3次
A1L	1回目	3.662	7.349	11.133
	2回目	3.662	7.324	11.108
	比率	1.000	1.003	1.002
A1R (破断素線有含む)	1回目	3.076	6.152	9.229
	2回目	3.076	6.152	9.399
	比率	1.000	1.000	0.982
A2L	1回目	3.247	6.543	9.741
	2回目	3.247	6.494	9.790
	比率	1.000	1.008	0.995
A2R	1回目	3.711	7.446	11.108
	2回目	3.711	7.446	11.133
	比率	1.000	1.000	0.998

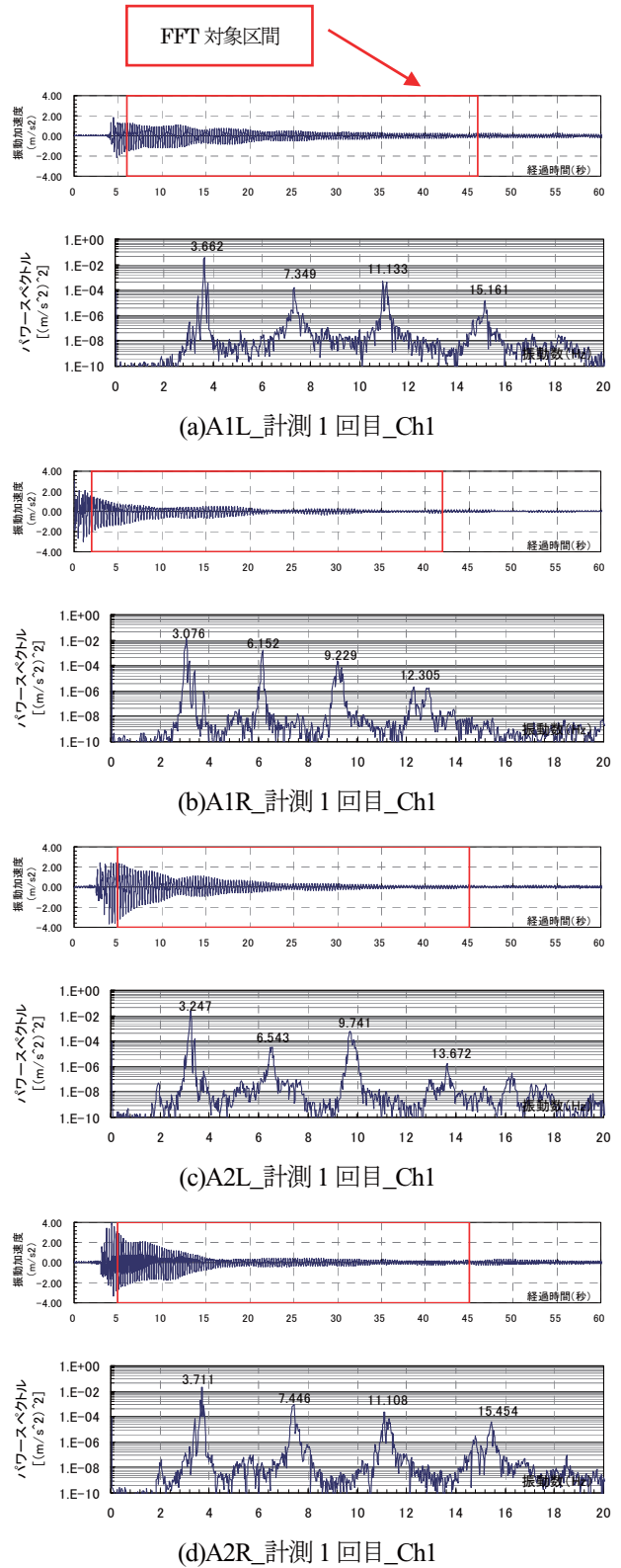


図-3 各ケーブルの加速度波形・パワースペクトル図

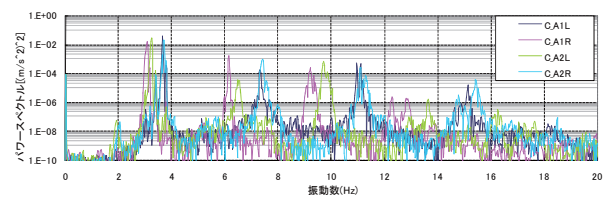


図-4 各ケーブルのパワースペクトルを比較

3.4 カーブフィッティング法による張力算定結果

算出した各ケーブルの固有振動数に対してカーブフィッティング法を用いて導出した張力を表4に示す。表より曲げ剛性項に負の符号を持つ値が確認できる。これは同定された固有振動数の次数が3次までと少ないこと、被覆のないPWSのため曲げ剛性が小さいこと等に起因すると考えられる。このため、曲げ剛性を無視し、式(1)の第2項のみで算出した張力を表5に示す。図-6に同定張力を平面図にプロットしたものを示す。図より著しい張力の抜け等は無いが、張力がA1, A2ともに左右で3割以上の差があることがわかる。また、対角のケーブルで張力が近似し、最も損傷が大きく素線の一部が断線しているA1Rの張力とA2Lの張力が近似している。したがって、各張力のバランスの崩れは、素線断線等の損傷に起因するものではなく、施工時のキャンバー合わせによって生じた影響が大きいものと推察される。

表4 張力算定結果 (曲げ剛性考慮)

ケーブル番号	両端単純支持(曲げ剛性考慮)の場合				
	曲げ剛性項	張力項	曲げ剛性	張力	T/Ta
	$a(n^2)^2$	$b(n^2)$	EI(kNm ²)	T(kN)	%
A1L	0.05683	13.29748	32.37	236	21.0%
A1R	0.00046	9.46033	0.26	168	14.9%
A2L	-0.04259	10.78968	-24.26	191	17.0%
A2R	-0.03769	13.95281	-21.47	248	22.0%

※Ta: 許容張力(=破断強度2810kN/安全率2.5=1124kN)

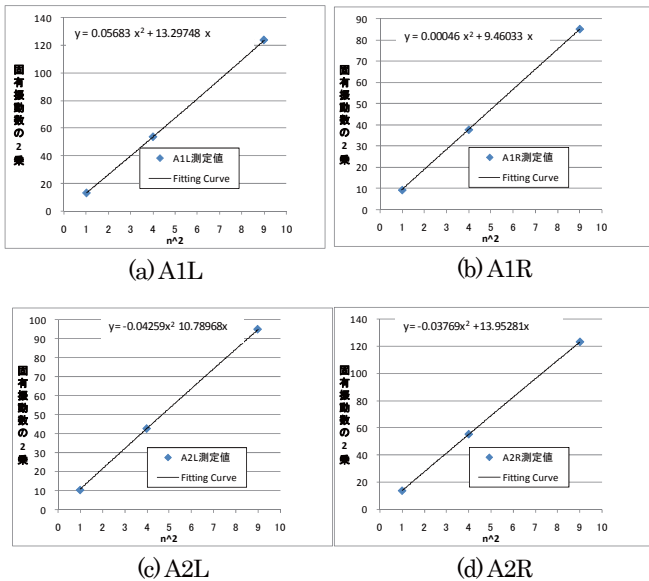


図-5 各ケーブルのカーブフィッティング

表5 張力算定結果 (曲げ剛性無視)

ケーブル番号	両端単純支持(曲げ剛性無視)の場合				
	振動数1次	振動数(1-2)	振動数(2-3)	振動数(平均)	張力
	f1(Hz)	f2-1(Hz)	f3-2(Hz)	fa(Hz)	T(kN)
A1L	3.662	3.687	3.784	3.711	244
A1R	3.076	3.076	3.077	3.076	168
A2L	3.247	3.296	3.198	3.247	187
A2R	3.711	3.735	3.662	3.703	243

※Ta: 許容張力(=破断強度2810kN/安全率2.5=1124kN)

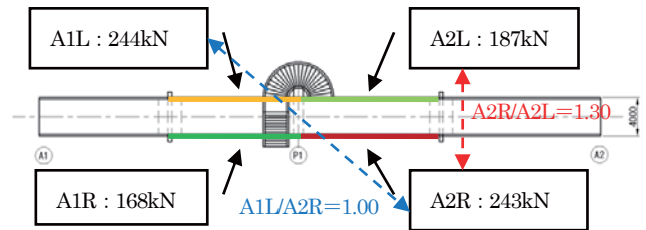


図-6 各ケーブルの同定張力

4. 橋全体振動モードの同定

4.1 橋全体振動の分析方法

斜張橋全体の鉛直振動データは以下に示す手順で分析し、固有振動のモード同定を行った。

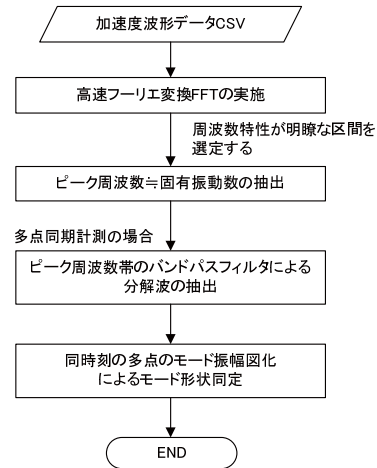


図-7 橋全体振動の分析手順

4.2 橋全体振動の採用ケース

測定は2回実施したが、各Chで卓越振動数が近似しており再現性を確認できたことから、1回目の測定データをモード形状同定に使用する。図-7にCh1の1回目の加速度波形を、図-8, 9に各Chの1回目の加速度波形に対するフーリエスペクトル図を示す。

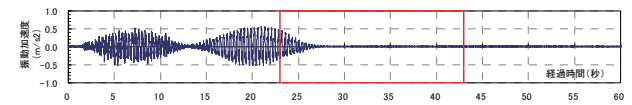
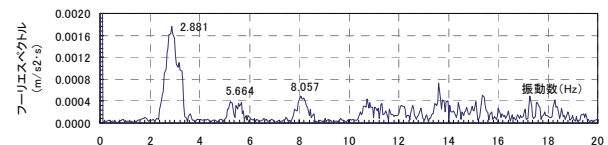
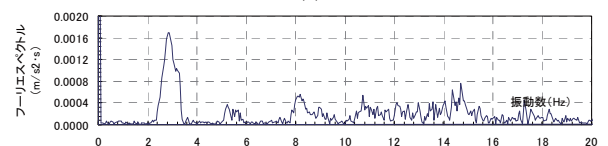


図-7 Ch1の加速度波形 (1回目)



(a) Ch1



(b) Ch2

図-8 A1側計測点のフーリエスペクトル

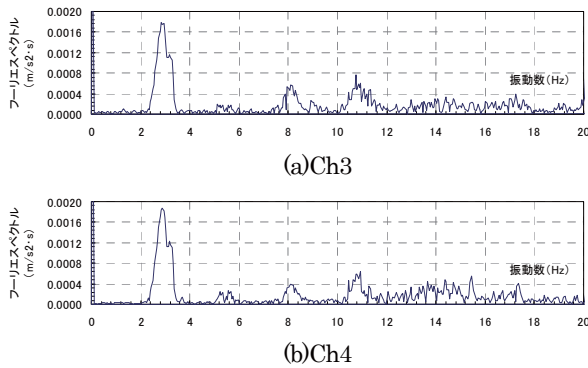


図-9 A2 側計測点のフーリエスペクトル

4.3 モード同定結果

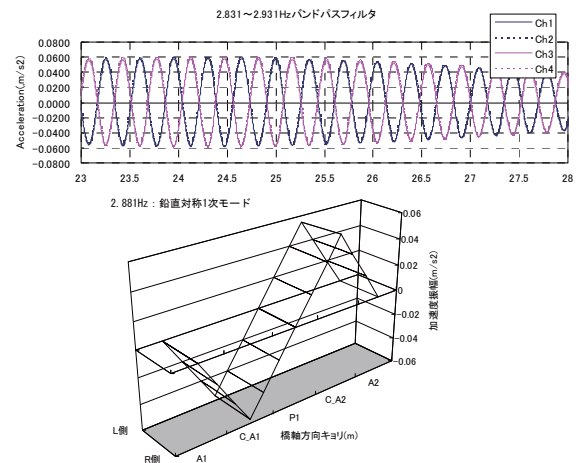
加速度波形から 1～4 次の固有振動数に対する振動モードを求めた。各波形に対し、1～4 次の固有振動数の前後 0.05Hz のバンドパスフィルタにより分解波を抽出した。図-10 に抽出した分解波と振動モードを固有振動数毎に示す。抽出結果から、1 次の 2.88～2.98Hz にて鉛直対称 1 次モード、4 次の 10.74～10.89Hz にてねじれ対称 1 次モードが同定された。

橋全体振動の 1 次の固有振動数は 2.88～2.98Hz に分布している。立体横断施設技術基準⁴⁾にて歩行者に不快感を与えないように歩道橋の 1 次の固有振動数は 1.5～2.3Hz とならないように設定するとされている。本測定値はこの範囲外に位置しており、供用開始から 40 年経過後の現在においても振動使用性は満足されている。

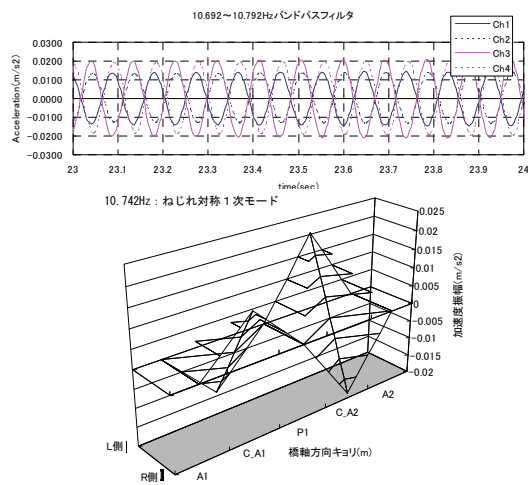
5. まとめ

実際の斜張橋形式歩道橋において腐食が進行した裸使用垂鉛めっき PWS に対して振動法による張力測定と橋全体振動の測定を実施し、以下の知見を得られた。

- 1) ケーブル張力同定にカーブフィッティング法を適用した結果、曲げ剛性項の係数が負の値になった。これは同定された固有振動数の次数が 3 次までと少ないこと、被覆のない PWS のため曲げ剛性が小さいこと等に起因すると考えられる。以上のことより、カーブフィッティング法は小規模なケーブルに対して、張力は評価できるものの、曲げ剛性の同定精度に課題があることがわかった。
- 2) 導出した値から著しい張力の抜け等は無いが、張力が A1, A2 とともに左右で 3 割程度の差があることがわかった。また、対角のケーブルで張力が近似していることから、各張力のバランスの崩れは、素線断線等の損傷に起因するものではなく、施工時に生じた可能性が推察された。
- 3) 橋全体の鉛直振動を計測し、モード同定を行った結果、現在の状態でも歩道橋としての振動使用性に問題が無いことを確認した。



(a) 鉛直対称 1 次モード(2.88～2.98Hz)



(b) ねじれ対称 1 次モード(10.74～10.89Hz)

図-10 橋全体振動の分解波と振動モード

参考文献

- 1) 日経 BP 社：日経コンストラクション, 2011.06
- 2) 頭井洋, 新家徹, 濱崎義弘：振動法によるケーブル張力実用算定式の補正, 土木学会論文集 NO.525/I-33, pp.351-354, 1995.10
- 3) 宇津野 秀夫, 山極 伊知郎, 遠藤 浩司, 杉井 謙一：振動伝達関数法によるケーブル張力と曲げ剛性の同時推定法, 構造工学論文集 Vol.44A, pp.853-860, 1998.3
- 4) 社団法人日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説, 1979.1