

(108) 振動法による外ケーブル張力の計測

(株)ピー・エス 技術研究所 正会員 ○久保明英  
 首都高速道路公団 神奈川管理部 正会員 佐藤佳孝  
 首都高速道路公団 神奈川管理部 正会員 斉藤一成  
 (株)ピー・エス東京支店土木技術部 正会員 佐藤正明

1. まえがき

外ケーブル工法で造られる橋は年々増えており、ケーブル張力を随時確認できる、簡便で正確な測定方法を用意することが必要となっている。緊張用ジャッキを取り付け、ケーブルを再度引張って張力を計る方法は、取り付ける空間を確保していない多くのケースで不可能である。ケーブルに歪みゲージを予め貼付しておく方法は、維持管理上の制約から新設後比較的短い期間しか有効でなく、ゲージが破損した場合、またゲージを貼付していない場合は残存張力の計測が出来ない。これらに較べ、外ケーブルを揺らしてその加速度を計測し、加速度波形より固有振動数を求め、これと振動長を理論式に代入し残存張力を求める振動法は、作業が簡単で、しかも必要な時に随時計測可能な方法であり、残存張力計測方法の有力候補と思われる。振動法における振動長については、張力が分かっている初期の時点に予め計測しておくのが一般的と思われるが、自明の固定長を参考して振動長を適当に推定するようなことが可能かもしれない。

本稿では、実寸大外ケーブル模型を使い、固定長、ケーブル張力を変化させて振動長を測定した試験の結果について報告する。また、外ケーブル工法で造られた首都高速道路のPC連続橋において、新設時の平成5年、また5年後の平成10年に行った試験の結果について報告する。

2. 外ケーブル模型を用いた試験

2.1 試験方法

プレテンション方式でPC桁を製作する時用いる反力台に、シングルストランドT15.2を複数本束ねた外ケーブルを懸け、これに所定の緊張力を導入する。外ケーブルを揺らして、ケーブル横方向の加速度を時刻歴で計測する。計測した加速度の時刻歴波形を取り込んでFFT解析を実行し、外ケーブルの固有振動数を求める。求まった固有振動数と外ケーブル張力から、(式1)を用いて振動長を計算し、これとケーブル固定長とを比較する。外ケーブル模型試験の状況を写真-1に示す。

$$L = \frac{1}{2 \cdot f_1} \sqrt{\frac{T \cdot g}{w}} \quad \dots\dots\dots (式1)$$

- ここで、T : ケーブル張力 (t f)
- L : ケーブルの振動長 (m)
- w : 単位長さ当たり重量 (t f / m)
- f<sub>1</sub> : 横揺れ振動の固有振動数 (sec<sup>-1</sup>)
- g : 重力加速度 (= 9.8 m / sec<sup>2</sup>)

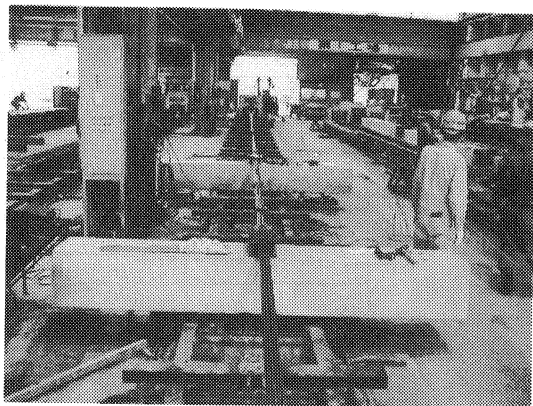


写真-1 外ケーブル模型試験の状況

2.2 外ケーブル模型

外ケーブル模型を次の要領で製作する。間隔60mで建つプレテンション桁製作用反力台の間に12本の

シングルストランドT15.2を懸ける。12本中の6本にはロードセルをセットし、試験中のストランドの張力を計測する。12本のストランドは、束ね治具に通して2段階で絞り、所定の固定区間で束ねた1本のケーブルとなるようにする。張力導入後、束ねた1本のケーブル部分を、所定の固定区間長位置で治具で押さえる。導入張力は60tf、80tf、100tfの3種類とする。ケーブルの固定区間長は20m、15m、10m、5mの4種類とする。また、6本のストランドを束ねた模型を用いて、同様の試験を行う。6本模型では導入張力は40tf、60tf、80tfの3種類とする。模型の概要を図-1に示す。

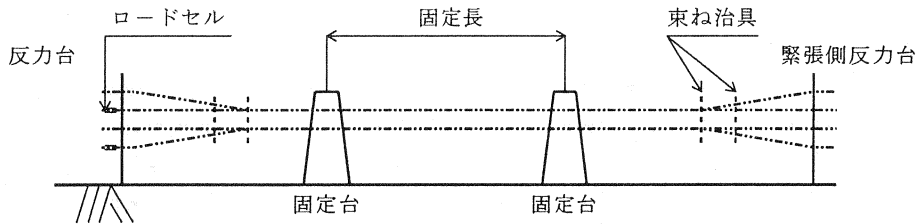


図-1 模型の概要

一方の反力台のストランド定着部は可動となっており、ストランドを定着した定着部を大型油圧ジャッキで押し出して、ストランドに緊張力を与える仕組みとなっている。緊張力導入後は、定着部を固定した後油圧ジャッキの油圧を解放する。固定台は重量約500kgfの枕木形状のコンクリートブロックを置いたものである。固定台の上に鋼製半割円筒管を置き、これにケーブルを鋼板でボルト締めして固定する。1次束ね治具として、マルチストランド用定着ブロックを用いた。これは鋼製円柱の円形断面に蜂の巣状のストランド通し孔を開けたものである。2次束ね治具として、厚さ32mmの4角鋼板にφ90mmの孔を開けたものを用いた。

### 2.3 試験ケース及び計測方法

試験では、固定区間内でケーブルを揺らし、固定区間ケーブル中央位置及び1/4分位置の計2箇所、横揺れ加速度を時刻歴で計測した。加振は各ケースで3回行った。従って、1ケースで6個の波形データを計測することとなる。また、試験時のストランド張力を読みとり記録する。試験ケースを表-1に示す。

表-1(1) 12T15.2の試験ケース

ケーブル種別	ケーブル固定長 (m)	導入張力 (tf)
12T15.2	20	100
		80
		60
	15	100
		80
		60
	10	100
		80
		60
	5	100
		80
		60

表-1(2) 6T15.2の試験ケース

ケーブル種別	ケーブル固定長 (m)	導入張力 (tf)
6T15.2	20	80
		60
		40
	15	80
		60
		40
	10	80
		60
		40
	5	80
		60
		40

## 2. 4 試験結果

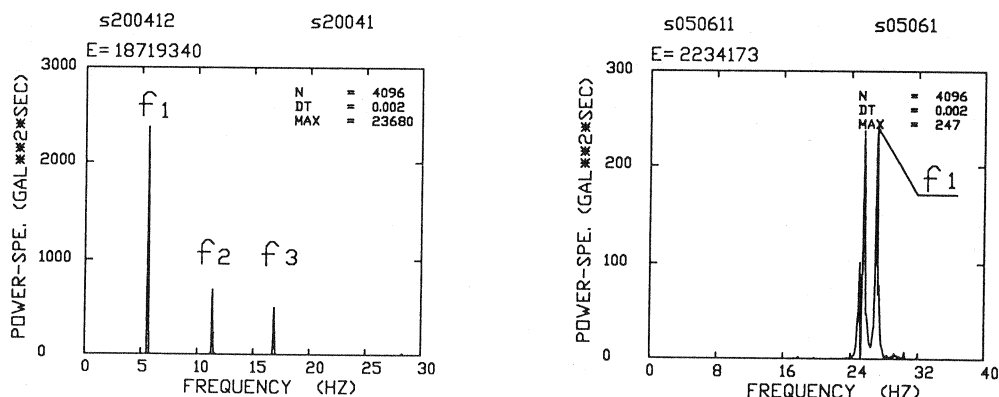
### (1) ロードセル読み値

ストランドにはロードセルを取り付け、試験時の張力を読みとった。12本束ねたケーブルの試験では、6本のストランドにロードセルを取り付けた。6本束ねたケーブルの試験では、ストランド全数にロードセルを取り付けた。

外ケーブル模型に張力を導入した後、ストランド定着部を固定してジャッキの油圧を解放するが、油圧解放の前後におけるロードセル読み値に変化は無かった。また、ケーブルを所定の支持間隔で置かれた固定台にケーブルを押しつけて固定するが、この前後でロードセル読み値に変化は無かった。

### (2) ケーブル固有週波数及び振動長

ケーブルを人力で揺らし、ケーブル支間中央位置及び1/4分位置にマグネットで装着した加速度計で、ケーブルの横揺れ加速度を時刻歴で計測した。デジタルデータレコーダへの記録は、時間間隔0.002秒で行った。計測した加速度時刻歴データから、4096個のデータを取り込んでFFT解析を行い、フーリエスペクトル値が突出する週波数をケーブル固有週波数として読みとった。なお、解析に取り込んだデータ数(=4096個)と時間間隔(=0.002sec)で決まる、周波数分解能は $df = 0.12207 \text{ sec}^{-1}$ であり、従って読みとった固有周波数には $\pm 0.5df$ の誤差がありえる。ケーブル振動モードに係る固有周波数は、当該試験で描いたほとんどのスペクトル図上で突出しており、これらでは選定を誤る能性は低い。また、1ケースで得られる波形記録は6個であるが、6個から得られる固有周波数は、どのケースにおいてもほぼ同じであった。代表的なフーリエパワーペクトル図を図-2(1)に示す。ケーブルが25Hz程度で揺れる場合、スペクトル図上の25Hz付近に複数の突出が生じ、そのケースだけ参照したのでは固有周波数の選定が難しいケースが2~3あった。これは、25Hz付近にケーブル振動モード以外の固有周波数が存在し、それがケーブルの揺れに共振するためと思われる。この一例を図-2(2)に示す。



(1) 代表的な例

(2) 25Hz付近に他のモードが存在する例

図-2 フーリエパワースペクトル図

計測データから求めたケーブルの1次の固有周波数及び振動長を表-4に示す。表-4の張力Tは、ストランド12本のケースでは6台のロードセル読み値合計を2倍した値、ストランド6本のケースでは6台のロードセル読み値合計となっている。固定長は、固定台のケーブル押さえ治具間の距離を、治具中心位置で、巻き尺で2度測った値の平均値となっている。

表-4 固有振動数及び振動長

	張力	固定長	振動数	振動長		張力	固定長	振動数	振動長
	T (tf)	L <sub>0</sub> (m)	f <sub>1</sub> (Hz)	L (m)		T (tf)	L <sub>0</sub> (m)	f <sub>1</sub> (Hz)	L (m)
12本	92.635	19.99	6.714	19.521	6本	72.210	20.00	8.057	20.311
	73.564	—	5.981	19.528		53.089	19.96	6.958	20.167
	54.259	—	5.127	19.565		34.692	19.99	5.615	20.201
	92.377	15.06	8.789	14.892		72.436	15.03	10.620	15.434
	74.032	—	7.935	14.766		53.853	15.03	9.155	15.437
	54.189	—	6.836	14.664		34.545	15.02	7.446	15.201
	92.993	10.05	13.346	9.839		72.266	10.00	15.747	10.396
	73.688	—	11.963	9.771		53.590	10.00	13.672	10.312
	53.841	—	10.254	9.745		34.584	10.00	10.986	10.309
	92.452	4.96	27.344	4.788		72.215	4.96	31.332	5.223
	73.833	—	24.496	4.777		53.737	4.96	27.140	5.202
	54.229	—	21.606	4.641		34.883	4.96	21.973	5.176

## 2.5 外ケーブル模型試験の結果の評価

1) 表-4で、ストランド本数と固定長が同じ場合で比較すると、張力が異なっても振動長はほぼ同じとなっている。このことから、一度試験で求めた振動長は、張力が多少変化しても適用可能と考えられる。

2) 表-4で、ストランド本数が12本と6本の各々の試験ケースの中で、固定長が同じもの同士を比較すると、ケーブル張力が同じであっても振動長は異なっている。また、ストランド1本当たりの張力がほぼ同じであっても振動長は異なっている。すなわち、ストランド本数が異なるケーブルでは振動長は異なっていた。

3) 試験で得られた振動長は、ストランド12本のケースでは固定長(L<sub>0</sub>)より短く、ストランド6本のケースでは固定長(L<sub>0</sub>)より長い値となった。これは、ケーブル押さえ治具の曲げ拘束効果が十分でなく、押さえ点でケーブルの横変位あるいは傾斜(回転)が生じていたためではないかと思われる。

○ストランド12本のケース → 振動長(L) < 固定長(L<sub>0</sub>)

○ストランド6本のケース → 振動長(L) > 固定長(L<sub>0</sub>)

3. 実橋における計測結果

3. 1 橋梁新設時の計測(平成5年)

平成5年、首都高速湾岸線BY433工区に、外ケーブル方式で造られた2室箱桁断面の3径間連続PC箱桁橋が建設された。上り車線、下り車線各々に相同のPC橋が建設されている。この橋では、平成5年の完成直後に外ケーブルの振動試験を行って固有周波数を計測し、ケーブル振動長の測定及び導入張力の確認を行っている。外ケーブルの区画割りを図-3に示す。

上り車線桁の2室箱桁断面の対称位置にある外ケーブルL1及びL2、また下り車線桁のR1及びR2を対象に、各区間で計測を行っている。P<sub>46</sub>で始まる外ケーブルはP<sub>46</sub>の柱頭部で定着される。上り車線桁の外ケーブルは12T15、2のPE管グラウトタイプ、下り車線桁の外ケーブルはエポキシ樹脂被覆タイプであり、単位長さ当たりの重量(w)が異なっている。

上り車線桁のPE管グラウトタイプ :  $w = 20.849 \text{ kgf/m}$

下り車線桁のエポキシ樹脂被覆タイプ :  $w = 13.860 \text{ kgf/m}$

試験結果を表-5に示す。表-5の導入力は、ジャッキの導入緊張力読み値から定着時の損失分、偏角部の摩擦による損失分を差し引いた値となっている。測定周波数は2回の測定値の平均値となっている。外長は、コンクリート部から外に出た外ケーブル部分の長さとした。

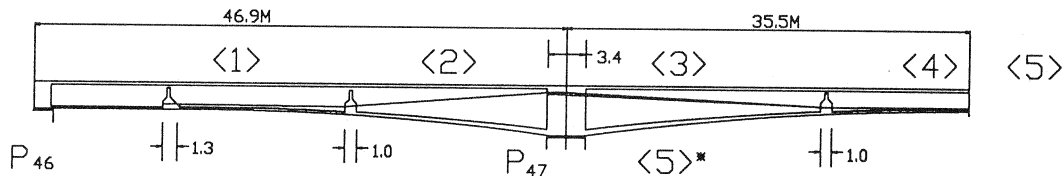


図-3 外ケーブルの区画割り

表-5(1) L1ケーブル

		L1-<1>	L1-<2>	L1-<3>	L1-<4>	L1-<5>
導入力	tf	192.1	201.6	198.6	195.6	195.9
周波数	Hz	10.156	8.789	7.227	6.641	7.227
振動長	m	14.79	17.51	21.14	22.83	20.99
外長	m	14.80	16.90	21.33	23.00	21.30

表-5(2) L2ケーブル

		L2-<1>	L2-<2>	L2-<3>	L2-<4>	L2-<5>
導入力	tf	192.1	201.6	198.6	195.6	195.9
周波数	Hz	10.059	8.789	7.227	6.641	7.227
振動長	m	14.94	17.51	21.14	22.83	20.99
外長	m	14.80	16.90	21.33	23.00	21.30

表-5(3) R1ケーブル

		R1-<1>	R1-<2>	R1-<3>	R1-<4>	R1-<5>
導入力	tf	192.1	201.6	198.6	195.6	195.9
周波数	Hz	12.305	10.547	8.594	7.91	8.594
振動長	m	14.98	17.90	21.80	23.51	21.65
外長	m	14.80	16.90	21.33	23.00	21.30

表-5(4) R2ケーブル

		R2-<1>	R2-<2>	R2-<3>	R2-<4>	R2-<5>
導入力	tf	192.1	201.6	198.6	195.6	195.9
周波数	Hz	12.305	10.742	8.789	8.203	8.789
振動長	m	14.98	17.57	21.32	22.67	21.17
外長	m	14.80	16.90	21.33	23.00	21.30

### 3. 2 5年後の計測(平成10年)

竣工後5年経過した平成10年に再び外ケーブルの振動試験を実施し、ケーブルの固有周波数を計測し、これと平成5年の試験で求めておいた振動長を用いて残存張力の確認試験を行った。試験結果を表-6に示す。

表-6(1) L1ケーブル

		L1-<1>	L1-<2>	L1-<3>	L1-<4>	L1-<5>
導入力	tf	192.1	201.6	198.6	195.6	195.9
振動長	m	14.79	17.51	21.14	22.83	20.99
周波数	Hz	9.570	8.398	7.031	6.445	7.031
張力	tf	170.5	184.0	188.0	184.2	185.3

表-6(2) L2ケーブル

		L2-<1>	L2-<2>	L2-<3>	L2-<4>	L2-<5>
導入力	tf	192.1	201.6	198.6	195.6	195.9
振動長	m	14.94	17.51	21.14	22.83	20.99
周波数	Hz	9.766	7.422	7.031	6.445	7.031
張力	tf	181.2	143.7	188.0	184.2	185.3

表-6(3) R1ケーブル

		R1-<1>	R1-<2>	R1-<3>	R1-<4>	R1-<5>
導入力	tf	192.1	201.6	198.6	195.6	195.9
振動長	m	14.98	17.90	21.80	23.51	21.65
周波数	Hz	11.914	10.156	8.398	7.813	8.398
張力	tf	180.2	187.0	189.6	190.9	187.0

表-6(4) R2ケーブル

		R2-<1>	R2-<2>	R2-<3>	R2-<4>	R2-<5>
導入力	tf	192.1	201.6	198.6	195.6	195.9
振動長	m	14.98	17.57	21.32	22.67	21.17
周波数	Hz	10.938	10.352	8.008	7.617	8.203
張力	tf	151.9	187.1	164.9	168.7	170.6

### 4. まとめ

(1) 外ケーブル模型を用いた試験では、ストランド本数、固定長が同じケースでは、張力が異なっても振動長はほぼ同じであった。従って、一度同じ外ケーブル構造で振動長を測定しておく、以後これを適用して、振動法により外ケーブルの残存張力を精度良く推定することが可能と思われる。

(2) ストランド本数が異なるケーブルでは、固定長が同じで、且つケーブル合計張力が同じであっても、振動長は異なるかもしれない。また、ストランド1本当たりの張力が同じであっても、振動長は異なるかもしれない。

(3) ストランド本数が6本の外ケーブル模型を用いた試験では、振動長が固定長より大きくなった。この原因は、押さえ治具の剛性が十分でなく、固定位置でケーブルが変位あるいは回転を生じてしまったのではないと思われる。なお、実橋では偏向部構造の変形剛性は十分大きいので、振動長が固定長より大きくなるような現象は起こらないかもしれない。

(4) 建設後5年が経過した首都高速湾岸線BY433工区の3径間連続PC箱桁橋で、4本の外ケーブルL1、L2、R1、R2に関し、振動法による張力測定を行った。外ケーブルの張力は、PC桁がクリープ及び乾燥収縮するに伴い減少するが、L1とR1では区間<1>~<5>でほぼ均一に減少していたのに対し、L2では区間<2>の減少が特に大きく、R2では区間<2>の減少が特に小さかった。張力減少量の区間による不均一については、設計で配慮が必要と思われる。また不均一は主に偏角部の摩擦に関わると考えられるが、今後解消される方向に向かうのか、あるいは増加する方向に向かうのか、注意が必要と思われる。

### 【参考文献】

1) 伊東昇、市川徹、後藤精三、石川善信：「首都高速湾岸線外ケーブルPC橋に関する実験及び実橋における計測結果」、PC技術協会第4回シンポジウム論文集(1994)