

# 連続ケーブル桁吊工法による既設 RC ゲルバー桁橋の補強法に関する研究

藤本 良雄\*1・堤 忠彦\*2・左東 有次\*3・日野 伸一\*4・松下 博通\*5

## 1. はじめに

千歳橋は、昭和30年に、一般国道3号が佐賀県鳥栖市と福岡県久留米市を境とする宝満川を渡河する位置に架設された橋長177.19 mの7径間連続RCゲルバーT桁橋である。図-1に橋梁の一般図を示す。

本橋は、九州を縦横に走る高速道路が交差する鳥栖ジャンクションに、国道3号がアクセスする所に位置するため、1日25,000台を越す交通量とともに、大型車混入率のきわめて高い主要幹線道路である。

そこで、本橋では、耐荷力増強を目的とした道路橋示方書の改訂に伴う車輛の大型化（設計活荷重 245 kN）に対処するため、構造的な欠陥部位となることが予想されるゲルバーヒンジ部の補強を目的として補強工事が計画・施工された。

本工事では、本橋の立地上・構造上の制約条件や、迂回路確保の困難さ等を考慮し、死荷重の増加が少なく橋梁下での作業が主で交通規制をほとんど必要としない、図-1, 2, 3に示すような外ケーブル工法による連続ケーブル桁吊工法が日本で初めて採用された。この工法の採用に際しては、施工時のケーブルの導入張力とデビエータ部に生じる鉛直反力の確認、および補強後のケーブル張力の長期管理方法の検証が必要であった。そこで、実施工に先立ち室内模型実験によりこれら一連の検討を行った。

本稿では、連続ケーブル桁吊工法の概要について述べるとともに、室内試験の結果について報告する。

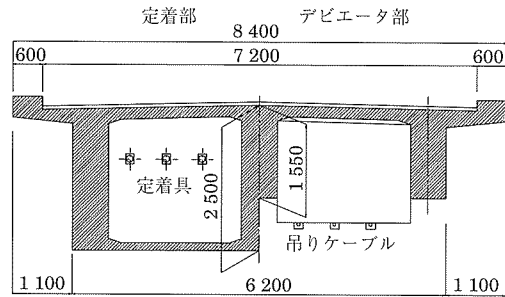


図-2 主桁断面図

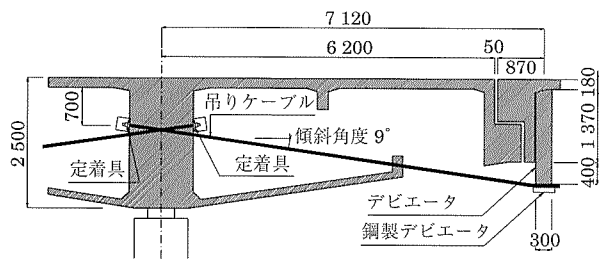


図-3 ゲルバーヒンジ部詳細図

## 2. 補強概要

連続ケーブル桁吊工法は、図-4に示すように桁間に配置した外ケーブルを緊張して、ゲルバーヒンジ部の支点反力をあらかじめ軽減しておくことにより、活荷重作用時の

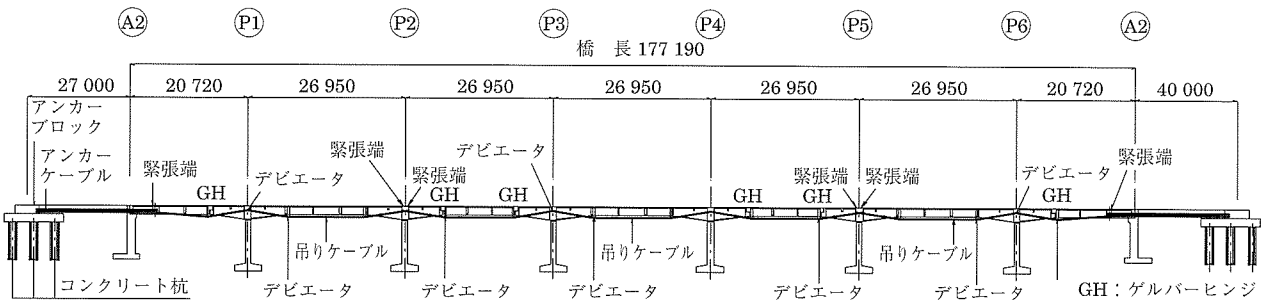
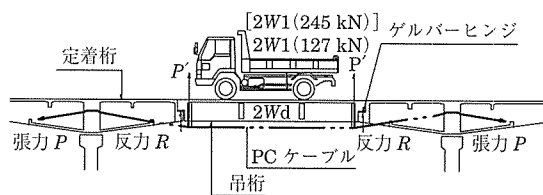


図-1 千歳橋一般図

\*1 Yoshio FUJIMOTO：(株)富士ピー・エス 福岡支店 副支店長  
 \*2 Tadahiko TSUTSUMI：(株)富士ピー・エス 技術本部 次長  
 \*3 Yuji SATO：(株)富士ピー・エス 福岡支店 課長  
 \*4 Shin-ichi HINO：九州大学大学院 工学研究院 助教授  
 \*5 Hiromichi MATSUSITA：九州大学大学院 工学研究院 教授



補強前： $R1 = Wd + W1 (127 \text{ kN})$   
 補強後： $R2 = Wd + W1 (245 \text{ kN}) - P'$   $R1 = R2$

図 - 4 連続ケーブル桁吊工法概念図

表 - 1 ゲルバーヒンジ部の活荷重反力

当初荷重 (13 t 荷重) による反力	B 活荷重 による反力	増加反力
470 kN	784 kN	314 kN

支点反力を当初の設計支点反力と同程度、もしくはこれを下回る状態に補強する工法である。なお、活荷重の増加に伴うゲルバーヒンジ部の反力増加は表 - 1 に示す 314 kN である。

外ケーブルは橋梁全長にわたって配置し、吊桁のゲルバーヒンジ部には横桁を増設して偏向具を用いた支承を設け、支点反力を受ける構造とした。吊りケーブルとアンカーケーブルの張力は、定着部で釣り合う構造としている。また、アンカーケーブルの張力は、橋梁外の杭式のアンカーブロックに支持させることにより、主桁には吊りケーブルによる軸力が作用しない他定式構造とした。本工法の特徴は以下のとおりである。

- ①橋梁外にアンカーブロックを構築してケーブル張力を支持することにより、主桁に軸力の作用しない構造となり、既設の構造を変えずにゲルバーヒンジ部のみの補強が可能である。
- ②コンクリートデビエータ施工時のコンクリート打設を橋面から行う際に一部の交通規制を必要とするだけで、その他の作業はすべて橋梁下からの作業である。
- ③15.2 mm という細径の PC ストランドケーブルを使用することで、組合わせ本数により補強レベルを任意に設定できる。なお、本橋では、アンカーケーブルに 5S15.2B を 2 条、吊りケーブルに 3S15.2B を 4 条使用した。

### 3. 設計概要

設計は、主桁と連続ケーブルを部材としてモデル化した解析モデル (図 - 5) を使用して平面骨組み解析で行った。

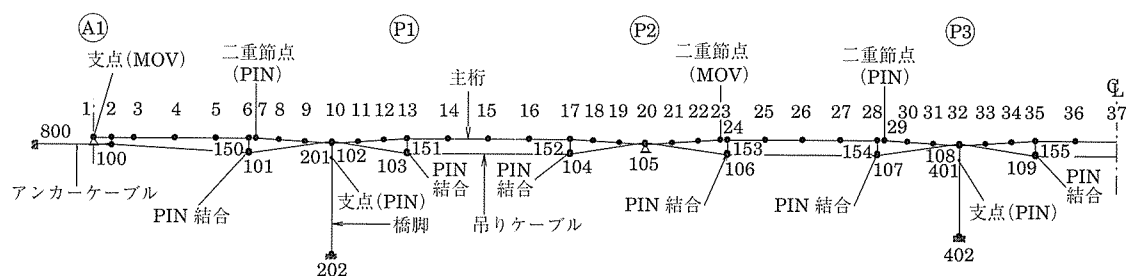


図 - 5 平面骨組解析モデル

デビエータ部での鋼製偏向具と PC ケーブルの相対移動は図 - 6 に示すように両端をピン結合したダミー部材を設定することで再現した。

PC ケーブルの張力による影響は、ケーブル部材に所定の張力に相当する軸ひずみ (温度荷重) を与えて解析した。また、設計張力の決定は以下の点を考慮して、繰り返し計算を行った。

- ①各偏向部におけるケーブルの角度変化によるロスおよび定着部のセットロスを考慮する。
- ②ケーブル張力により偏向部に作用する鉛直力で、ゲルバーヒンジ部の軽減反力を表 - 1 に示す 314 kN 以上確保

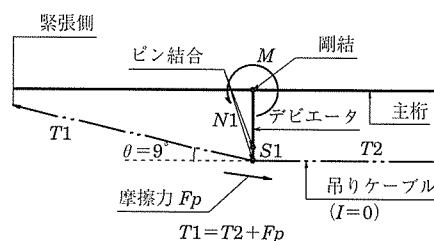


図 - 6 デビエータ部モデル詳細図

表 - 2 各区間の設計張力

区 間	No.	張力 (kN)
アンカー～A1	800 - 100	2 267
緊張端 A1 - P1	100 - 101	2 211
	101 - 102	2 348
P1 - P2 緊張端	102 - 103	2 347
	103 - 104	2 249
	104 - 105	2 315
緊張端 P2 - P3	105 - 106	2 429
	106 - 107	2 390
	107 - 108	2 182
P3 - P4	108 - 109	2 079
	109 - 110	2 204

表 - 3 ゲルバーヒンジの設計軽減反力

ヒンジ No.	軽減反力 (kN)
6	432
13	328
17	344
24	343
28	323
35	441

保する。

- ③固定支承部に生じる水平力および主桁部材に生じる軸力を張力の5%以下とする。

表 - 2, 3 に各ケーブル位置におけるケーブル張力とゲルバーヒンジ部の軽減反力の計算結果を示す。

#### 4. 室内試験

本工法で施工を行う上では下記のような課題があるため、それらを解決するための室内試験を行った。

- ①ケーブル導入張力の管理方法の確立
- ②張力導入により発生するデビエータ部の鉛直反力の確認
- ③補強後の長期的なケーブル張力の管理方法の確立

##### 4.1 ケーブルの導入張力確認試験

###### (1) 試験目的

本橋では、図 - 7 に示すようなエポキシ被覆 PC 鋼より線 IS15.2 (SWPR7B) をケーブルとして使用する。施工時のケーブル導入張力管理は、ケーブルの伸び計測によるが、より正確を期すために、一部ロードセルにより直接張力を計測するとともに、全ケーブルに貼付したひずみゲージを用いることとする。そのため、ケーブルの表面にゲージを貼り付けることによって、適正な張力を測定することの妥当性を検証するとともに、ケーブルのひずみを張力に換算するために必要な伸び剛性 (EA) を求めた。

###### (2) 試験方法

図 - 7 の PC ケーブルの表面にひずみゲージを貼り付け、万能試験機を用いて引張試験を行った。また、供試体がより線であることから、ゲージ長によっては測定されるひずみに差異が出ることも予想されるため、試験では表 - 4 に示すようなゲージ長が 2 mm, 5 mm, 10 mm の 3 種類のゲージを用いた。使用したケーブルの規格値を表 - 5 に示す。

表 - 4 ひずみゲージの種類

種類	ゲージ長	供試体数
FLA - 2 - 11	2 mm	3
FLA - 5 - 11	5 mm	3
FLA - 10 - 11	10 mm	3

表 - 5 ケーブルの規格値

記号	呼び名	エポキシ被覆 PC 鋼線		PC 鋼より線 (JIS G 3536-1984)			
		基本外径	基本膜厚	標準径	0.2% 永久伸びに対する荷重	引張強度	伸び
SWPR7B	15.2	16.4 mm	600 μm	15.2 mm	221 480 N	260 680 N	3.5 %

###### (3) 実験結果と考察

6本の素線にひずみゲージを貼り、測定した PC ケーブルの荷重—ひずみ曲線の一例を図 - 8 に示す。測定値は、各対面するひずみゲージの平均値である。また、図 - 7 に示す PC ケーブル 1 本あたりの弾性係数と断面積を用いた伸び剛性 (EA) による荷重—ひずみ曲線をメーカー値として図 - 8 に併記する。なお、メーカー値の弾性係数は、PC ケーブル 1 本の荷重—ひずみ曲線より求めた実験値である。

試験結果より 7 本の素線のうち、任意の対面する 2 本のひずみを計測することによって、各素線間のばらつきなく計測可能なことが明らかになった。また、測定値の方がメーカー値より伸びが小さいことがわかった。これは、測定値は素線のひずみを測定しているのに対して、メーカー値は、PC ケーブル全体のひずみを測定しているため、ケーブルのなじみなどにより、ひずみが大きくなったものと推察される。

7 本の素線で構成された PC ケーブルの導入張力をひずみゲージの試験結果から算出するためには、1 ケーブルとしての張力  $P_{cat}$  と、ひずみを関係づける伸び剛性値を試験結果より求める必要がある。この張力は、以下の (1) 式により求めるものとする。

$$P_{cat} = (EA) \times \epsilon \quad (1)$$

ここに、 $P_{cat}$ : 張力 (N)

$EA$ : 伸び剛性 (N)

$\epsilon$ : 対面する 2 本の素線の平均測定ひずみ

ゲージ長の異なる 3 種類のゲージを、PC ケーブルの表裏に 2 箇所 1 組で貼った各 3 本の供試体の伸び剛性の試験結果を表 - 6 に示す。表より、供試体ごとの測定値の差はほとんど見られない。そこで、張力算定には平均の伸び剛性  $EA = 3.25 \times 10^7$  (N) を用いるものとする。

表 - 6 測定値から算出した EA の値 (N)

種類	FLA - 2 - 11	FLA - 5 - 11	FLA - 10 - 11
供試体 NO. 1	$3.180 \times 10^7$	$3.225 \times 10^7$	$3.180 \times 10^7$
NO. 2	$3.230 \times 10^7$	$3.189 \times 10^7$	$3.230 \times 10^7$
NO. 3	$3.254 \times 10^7$	$3.312 \times 10^7$	$3.254 \times 10^7$
平均	$3.261 \times 10^7$	$3.242 \times 10^7$	$3.261 \times 10^7$
全体平均	$3.25 \times 10^7$		
メーカー値	$2.69 \times 10^7$		

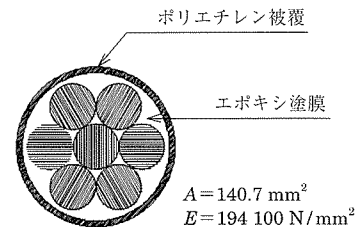


図 - 7 ケーブル断面図

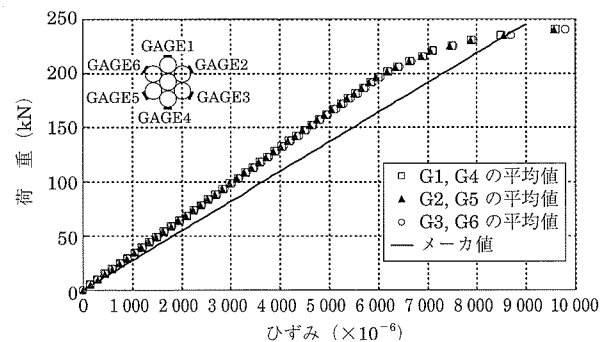


図 - 8 PC ケーブルの荷重—ひずみ曲線 (FLA-5-11)

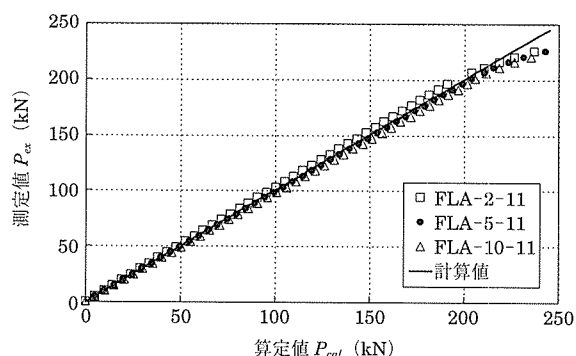


図-9 張力の測定値と算定値の比較

3種類のひずみゲージで測定したひずみより計算した張力の計算値と、ロードセルによる測定値を図-9に示す。図より、ゲージ長による差はほとんど認められない。しかしながら、素線の径5mmを考慮すると、10mmゲージは複数の素線に跨ることになる。また、2mmゲージは作業面で問題がある。よって、5mmゲージがもっとも適していると考えられる。

#### 4.2 デビエータ部鉛直反力確認試験

##### (1) 実験目的

本実験は、PCケーブルに張力を導入することにより、デビエータ部に生じる鉛直反力を、それに取り付けた1台または2台のロードセルで正確に測定可能であるかを検証するものである。また、設計上想定される反力およびデビエータ部でのケーブル張力の摩擦損失についても検証した。

##### (2) 試験方法

図-10のような実橋のデビエータ部を模した縮尺約1/5の同一傾斜角9度のコンクリート供試体を製作した。図のように油圧ジャッキでケーブルを緊張し、ケーブル張力とロードセルによって測定される鉛直反力との関係を調べた。鋼製デビエータとコンクリート供試体の間に応力分布をよくするゴムパッキンを挿入し、ゴムパッキンの最適な硬度および厚さについても検討した。また、ひずみゲージをケーブルの裏表に貼付し、その平均ひずみでデビエータによるケーブル張力の摩擦損出量の確認を行った。

緊張力の導入は、3本のケーブルに均等に行い、張力の

表-7 反力試験の供試体の種類

NO.	ロードセル	ゴムの種類	ゴム厚
1	1台	CR-60	5mm
2			10mm
3		CR-50	5mm
4			10mm
5		NR-40	5mm
6			10mm
7	2台	CR-60	5mm
8			10mm
9		CR-50	5mm
10			10mm
11		NR-40	5mm
12			10mm

制御は各ケーブルに装着したロードセルで行った。ケーブルへの張力導入は、1本あたり10kNずつ、計30kNずつ漸増させ、実橋の設計張力に相当する合計450kNまで計測を行った。

供試体の種類を表-7に示す。試験は間詰めゴムパッキンの硬度を3種類、厚さを5mmと10mmの2種類とした。また、鉛直力の測定に際して、ロードセルの測定個数の影響を確認するため、ロードセル1台と2台の2種類について鉛直力を確認した。

##### (3) 実験結果と考察

図-11, 12に、それぞれロードセル1台、2台の場合について、合計張力と反力の関係をゴムの硬度及び厚さごとに示す。図中の実線の計算値は、幾何学的に計算したケーブルよりデビエータに働く鉛直力である。図より、ゴムの硬度の差による顕著な差は認められなかったが、ゴム厚は、10mmより5mmの方が鉛直力の測定値が過小となっており、ゴム厚の影響が大きなことが明らかになった。また、図-12より、ロードセルを2台用いた場合は、挿入したゴムの硬度や厚さにかかわらず、反力が精度よく計測できることがわかった。これより、デビエータ部に所要の反力が生じることが確認された。

一方、ロードセル1台の場合には、反力の計算値に対してゴム厚5mmで70~80%、ゴム厚10mmで85~95%

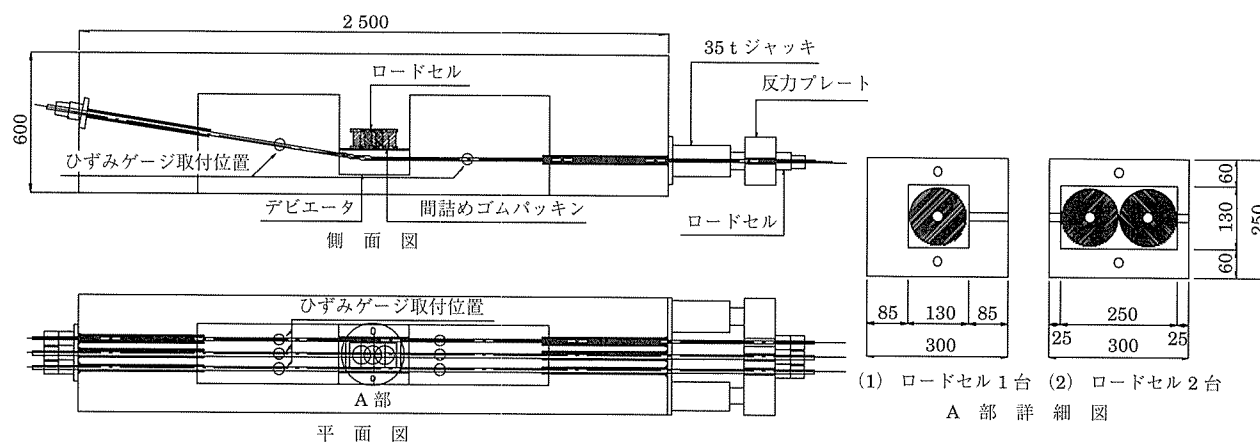


図-10 供試体概略図

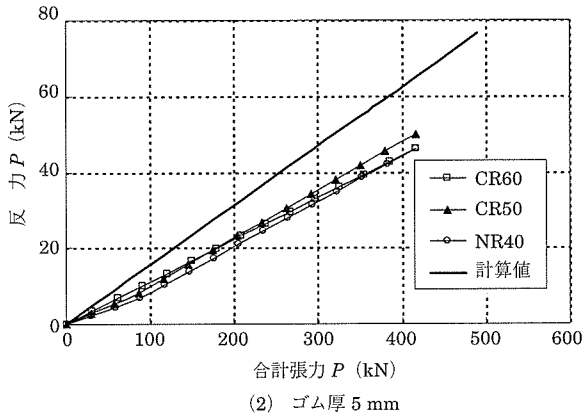
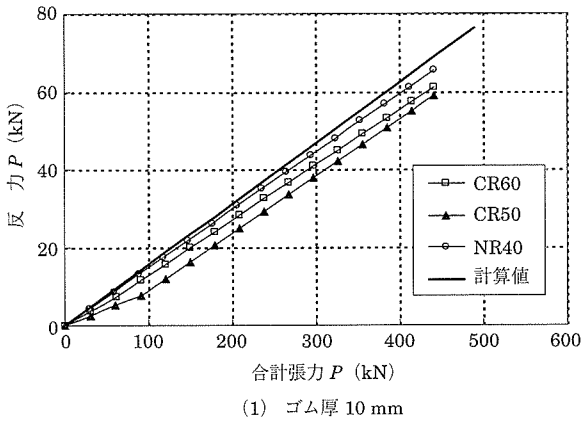


図 - 11 合計張力と反力曲線 (ロードセル 1 台)

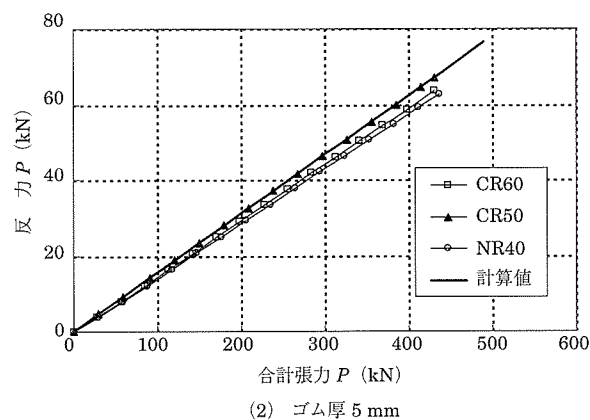
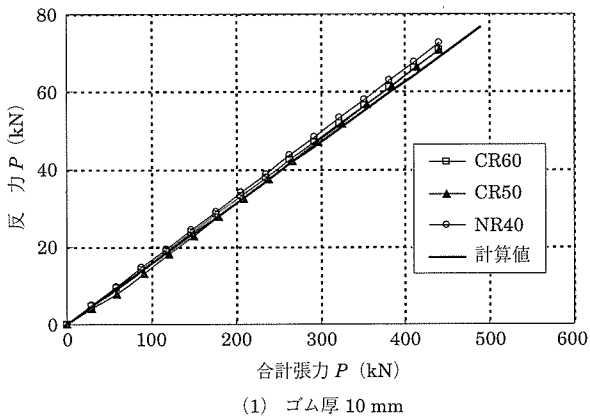


図 - 12 合計張力と反力曲線 (ロードセル 2 台)

と過小になっている。しかし、ほとんどが初期の張力レベルでの誤差によるものであり、導入張力が 50 kN 以上の範囲では、張力に対する鉛直反力の比率は、計算値に比べて数%の誤差でほぼ等しくなることがわかる。なお、荷重初期においては、ゴム板の変形が不均等になり、その結果、ロードセルに作用する反力も小さくなったものと推察される。

以上より、理想的には、2 台のロードセルで鉛直反力を計測することが望ましいが、施工性、経済性等を総合的に考慮すれば、厚さ 10 mm のゴムを挿入し、1 台のロードセルを用いて鉛直力を管理することが妥当であると考えられる。

導入張力とケーブルのひずみより計算した張力の関係を図 - 13 に示す。図より、導入張力と算定張力はほぼ等しく、また、デビエータを挟んだ 2 箇所での測定の算定張力もほぼ等しい。このことより、PC ケーブルに貼付したひずみゲージでケーブル張力は測定でき、また、デビエータによる張力の摩擦損失はほとんど無視できると考えられる。

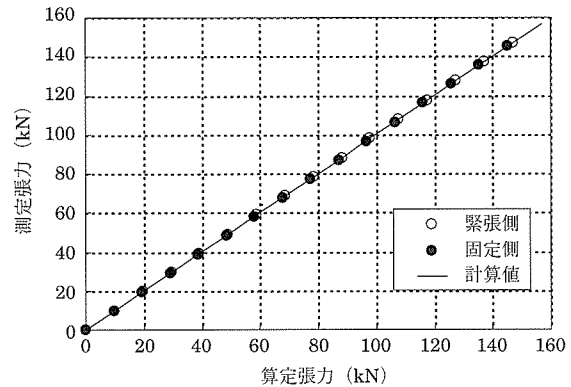


図 - 13 張力の測定値と計算値の関係 (ロードセル 2 個、ゴム厚 10mm)

### 4.3 ケーブル張力の管理手法に関する検討試験

#### (1) 試験目的

ケーブル張力の長期的な管理手法の確立は連続ケーブル桁吊工法では重要である。張力管理の方法としては、斜張橋等の張力管理で多用されている加速度計を用いた振動法による張力測定法がある。そこで、細径のケーブル 3 本が接触して並列配置された連続ケーブル桁吊工法に対するこの測定法の適用性について検証した。

#### (2) 試験方法

ケーブルの振動試験要領を図 - 14 に示す。試験は 6 m 間隔の反力台間にケーブル 3 本を並列に配置して緊張した後、加速度計を取り付けて強制的にケーブルを振動させ、振動数を測定した。その測定結果をもとに導入張力の推定を行った。

実橋においてケーブルを容易に加振できるのは、1 次振動であることから、本試験では 1 次振動モードに限定して固有振動数を計測する。

なお、張力の導入ステップは以下の各実験ともに 30 kN ピッチで漸増させた。

①ケーブル自体の曲げ剛性  $EI$  を計測するための静的曲げ

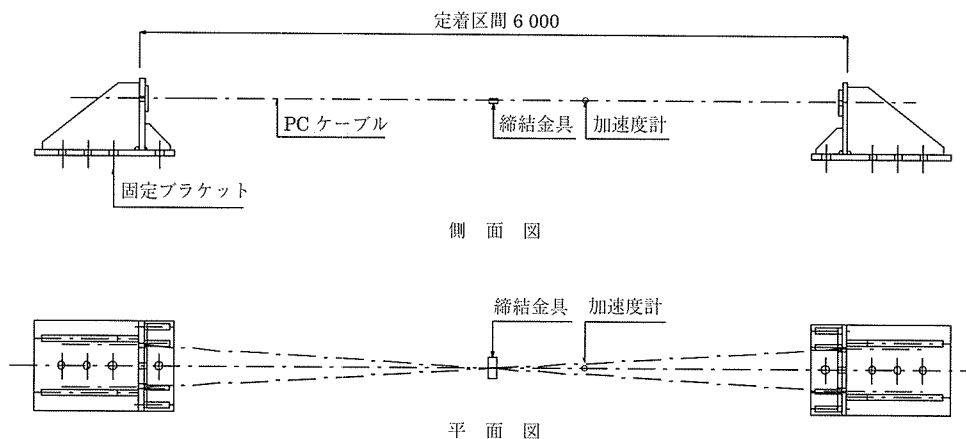


図 - 14 振動試験要領図

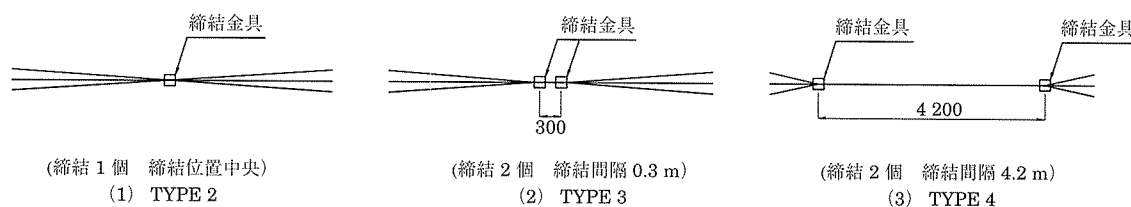


図 - 15 3本ケーブルの締結方法

表 - 8 振動試験の種類

TYPE	ケーブル本数	締結個数	締結間隔
TYPE 1	1本	—	—
TYPE 2	3本	1個	—
TYPE 3		2個	0.3 m
TYPE 4			4.2 m

試験。

- ②張力算定式の適合性を確認するためのケーブル1本の強制振動試験。
- ③ケーブル3本の強制振動試験。ただし、3ケーブルは図 - 15のように1箇所又は2箇所締結され、打撃方法は、締結位置付近を3本同時に打撃する場合と中央ケーブル1本のみ打撃する場合の2種類を比較した。振動試験の種類は表 - 8に示す4タイプとした。

(3) 実験結果と考察

斜張橋等のケーブル構造物に対して、ケーブル張力の実用的推定法としてケーブルの曲げ剛性 (EI) を考慮した振動法による張力算定式<sup>1)</sup>が (2) 式のように提案されている。

$$T = \frac{4w}{g} (f_1 \ell)^2 \left\{ 1 - 2.2 \left( \frac{C}{f_1} \right) - 2 \left( \frac{C}{f_1} \right)^2 \right\} \quad (\xi \geq 17) \quad \dots \dots (2)$$

$$C = \sqrt{\frac{EIg}{w\ell^4}}, \quad \xi = \sqrt{\frac{T}{EI}} \cdot \ell$$

ここに、

- T : ケーブル張力 (kN)
- w : ケーブルの単位重量 (kN/m)
- ℓ : ケーブル弦長 (m)
- g : 重力加速度 (9.8 m/s<sup>2</sup>)
- f<sub>1</sub> : 1次の固有振動数

ただし、スパン長やケーブル直径などにおいて適用範囲の重要性も指摘されているが、本室内試験では、ξ = 57 ~ 128 となり、(2) 式は適用できると考えられる。

本試験では、まず曲げ剛性を測定するため静的曲げ試験を行ったが、EIは非常に小さくなった。そのため、ケーブルの曲げ剛性を無視できると考えれば (2) 式の張力算定式は、(3) 式の弦理論<sup>1)</sup>と同一のものなり、これを用いてその適用性を検討した。

$$T = \frac{4w\ell^2}{g} \cdot f_1^2 \quad \dots \dots (3)$$

図 - 16 に、実験より得られたケーブル張力と固有振動数

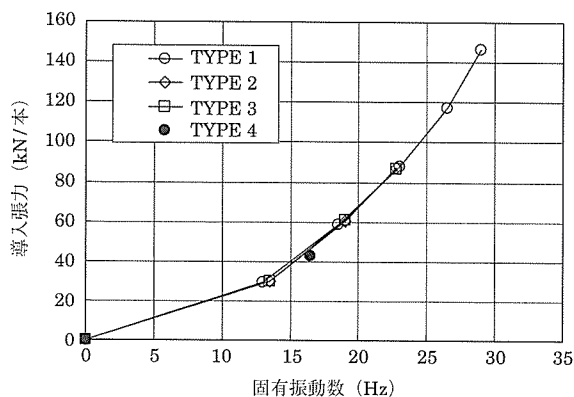


図 - 16 導入張力と固有振動数の関係

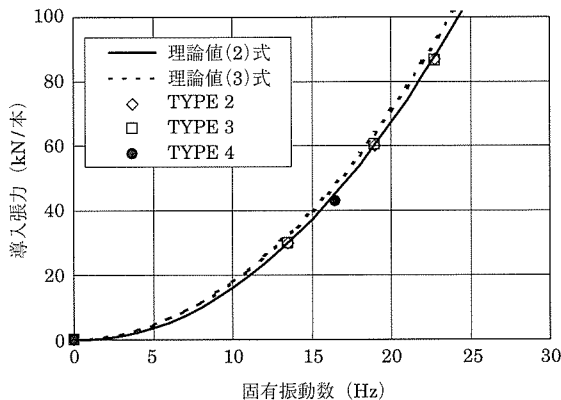


図 - 17 導入張力と固有振動数の関係 (ケーブル 3 本)

(1 次) の関係を示す。これより、ケーブル 1 本の導入張力一固有振動数の関係は 3 本の各タイプともほぼ一致していることがわかる。また、打撃点 (打撃場所)、締結位置およびその数の差異に関わらず、固有振動数に差異は認められない。これらのことより、ケーブルは 3 本締結されても一体のものみなされ、実験で得た固有振動数から張力算定が可能であるといえる。

つぎに、ケーブル 3 本の実験値と、(3) 式の弦理論で算出した計算値を図 - 17 に示す。また、ケーブルは 7 本の素線で構成されたより線であるが、ケーブルの断面に平面保持が成り立つと仮定し、図形的に素線のみについて算出した曲げ剛性  $EI = 0.3302 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$  を (2) 式に代入して計算した張力を図 - 17 に併記する。図より、計算値と実験値がきわめてよく一致していることがわかる。これより、現場のケーブル張力の長期的管理に対して、従来のケーブル構造に用いられている振動法が十分適用可能であるといえる。

## 5. ま と め

外ケーブル工法による連続ケーブル桁吊工法の施工時におけるケーブルの導入張力とデビエータ部に生じる鉛直反力の確認、および補強後のケーブル張力の長期管理方法の検証を目的として、室内模型実験を行った。その結果、以下のようなことが明らかになった。

### (1) ケーブルの導入張力確認試験

- ① 使用ケーブル 1S15.2 mm (SWPR7B) に対して、施工時の張力管理は対面 2 箇所貼付したひずみゲージを用いて精度よく行うことができる。また、その際用いるケーブルの伸び剛性は  $EA = 3.25 \times 10^7 \text{ N}$  が妥当である。
- ② ケーブルのひずみ計測に対して、ゲージ長の差異はほとんどなく、作業性を考慮してゲージ長 5 mm が適している。

### (2) デビエータ部鉛直反力確認試験

- ① 間詰め用ゴムパッキンには、ゴムの種類によらず、ゴム厚の厚い方が、実鉛直反力をより精度よく計測できることから、ゴム厚 10 mm を用いるのが適当である。
- ② 同一条件下で試験を行った結果、鉛直反力測定用ロードセルは、1 台よりも 2 台使用する方の精度がよいが、施工性、経済性を考慮すると、ロードセル 1 台でも実用上十分な精度を得られることが確認できた。
- ③ ケーブルの導入張力がデビエータを挟んだ両側でほぼ一致することから、デビエータ部のケーブル張力の角変化による摩擦損失はほとんど無視できると判断される。

### (3) ケーブル張力の管理手法に関する検討試験

- ① ケーブル 1 本のみ固有振動数とケーブル 3 本を締結した固有振動数はほぼ同じであり、また、締結個数およびその位置によらず同一であることが確認できた。
- ② 試験のケーブルの曲げ剛性はきわめて小さいことから、ケーブルの曲げ剛性を無視した弦理論を適用して、ケーブル張力を精度よく推定することができる。

最後に、本実験は連続ケーブル桁吊工法を実橋に採用するにあたり、本工法の合理的な維持管理方法を検証するために実施したものである。このような機会を提供して頂いた田原嘉和氏 (当時佐賀国道工事事務所長) に謝意を表します。

### 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実用算定式について、土木学会論文報告集、第 294 号、pp.25 ~ 32、1980

【2003 年 6 月 2 日受付】