

# 伊ノ浦橋の応力測定（才2報）及鋼材の温度分布並に振動測定について

村 上 永 一  
吉 田 巖

## § 1. 応力測定（才2報）

前年度報告した長期応力の測定結果はアーチの架設中の応力の変化及閉合精度のチェックであつたが、以下本節に述べるのはそれ以後上部床組の架設が進捗し舗装板コンクリート打設完了（死荷重満載）迄の荷重増によるアーチ応力を測定した結果を示す。

### (a) 測定装置

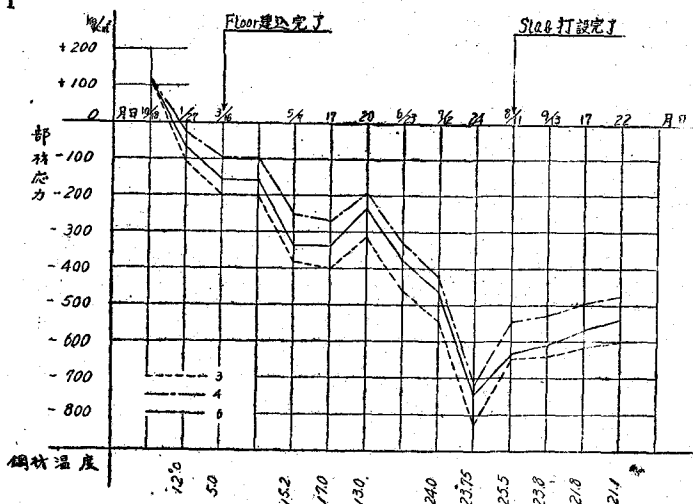
生研式歪計（詳細は前回の報告を参照されたい）を使用電気抵抗線歪計は測定途中昭和30年6月中に感度低下せるゲージが続出したので測定中止し前記測定器のみに頼つた。

### (b) 床組建込開始より上部工完了迄の架設応力

測定応力には死荷重応力の外に温度応力を含む。従つて鋼材温度を知る必要があり、それには銅—コンスタンタン熱電対を使用した。測定要領は § 2 参照。

尚応力の測定はアーチ全体の温度分布が一樣な時が望ましく早朝日出前に測定した。測定結果は次のグラフの如し。 針尾側上弦材

図 - 1



針尾側下弦材

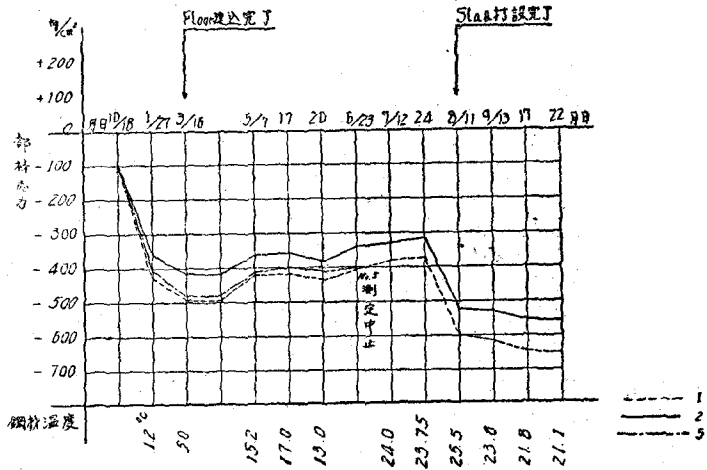


図-2

大車側上、下弦材

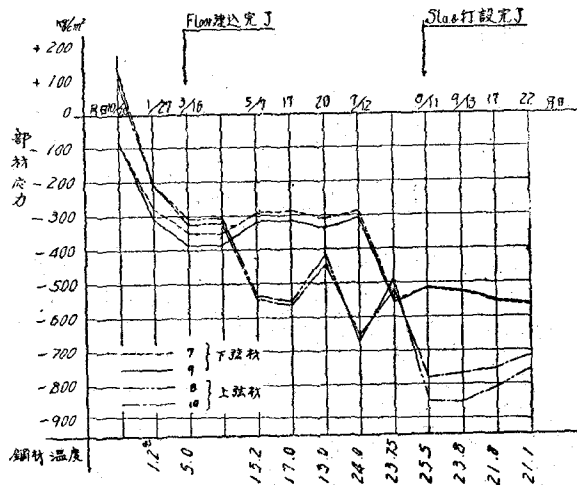


図-3

(c) 全死荷重応力

昭和30年9月22日高欄照明の建込及塗装を完了し足場が撤去された状態で最終測定を実施した。

測定時の部材温度は21.1℃で測定結果は次の如し。

( ) 内の値は測定時に対応する理論値を示す。

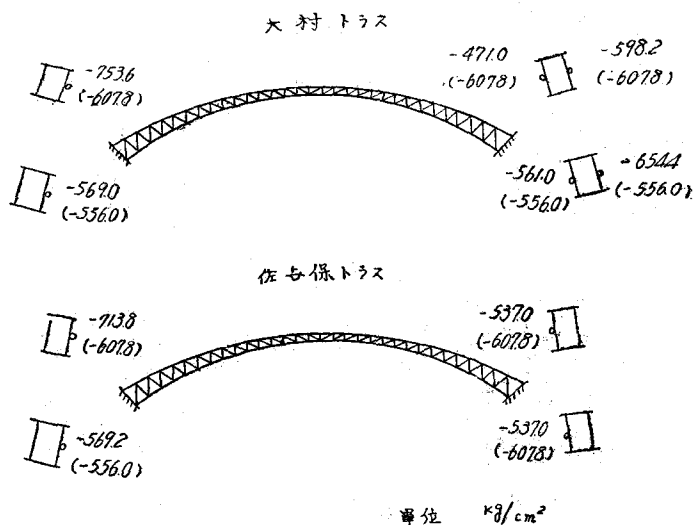


図 - 4

以上の結果を使用し設計応力表に対比出来る最大及最少応力を求め理論値との比較を示せば次表の如くなる。

実測結果 (床版高欄等全工事が完了した場合)

表 - I

|             |              |   |          | ①          | ②          | ③          | ④           | ⑤     | ⑥          |          |                |  |  |
|-------------|--------------|---|----------|------------|------------|------------|-------------|-------|------------|----------|----------------|--|--|
| 部<br>材      | 岸<br>ト<br>ラス | 側 | 実測<br>応力 | 換算実<br>測応力 | 換算実<br>測応力 | 換算実<br>測応力 | 理論活荷重<br>応力 |       | 実測換算<br>応力 |          | 理論設計<br>応力     |  |  |
|             |              |   | 21.7℃    | 15℃        | 0℃         | 30℃        | (+)         | (-)   | 最大<br>応力   | 最小<br>応力 |                |  |  |
| 上<br>弦<br>材 | 針<br>尾       | 内 | -471.0   | -367.6     | -120.1     | -619.1     | +187.1      | -2653 | -8844      | +670     | -1021.2 (+5.5) |  |  |
|             |              | 外 | -578.2   | -4968      | -247.3     | -7463      | +187.1      | -2653 | -10116     | -602     | -1021.2 (+5.5) |  |  |
|             | 佐世保          | 内 | -5370    | -4356      | -136.1     | -685.1     | +187.1      | -2653 | -9504      | +10      | -1021.2 (+5.5) |  |  |
|             | 大<br>串       | 内 | -7536    | -6522      | -402.7     | -901.7     | +187.1      | -2653 | -11670     | -2156    | -1021.2 (+5.5) |  |  |
| 佐世保         |              | 内 | -7138    | -6124      | -362.9     | -861.9     | +187.1      | -2653 | -11272     | -1757    | -1021.2 (+5.5) |  |  |
| 下<br>弦<br>材 | 針<br>尾       | 内 | -561.0   | -6034      | -707.7     | -499.1     |             | -2458 | -9535      |          | -948.5         |  |  |
|             |              | 外 | -6544    | -6768      | -801.1     | -592.5     |             | -2458 | -10469     |          | -948.5         |  |  |
|             | 佐世保          | 内 | 計器故障     |            |            |            |             | -2458 |            |          | -948.5         |  |  |
|             | 大<br>串       | 内 | -5690    | -6114      | -715.7     | -507.1     |             | -2458 | -9615      |          | -948.5         |  |  |
| 佐世保         |              | 内 | -5692    | -6116      | -715.9     | -507.3     |             | -2458 | -9617      |          | -948.5         |  |  |

## § 2. 鋼材温度の測定及温度応力の変化

### (a) 測定装置

横河電機製作所製携帯用熱電指示温度計（定格  $0 \sim 600^{\circ}\text{C} / 25 \text{ mV}$ ）を使用、但し感度を上げるため内部抵抗を短絡により落し銅—コンスタンタン線を使用した場合温度差  $100^{\circ}\text{C}$  で目盛盤上約  $16 \text{ mV}$  を画く如くにした。銅—コンスタンタン線の熱起電力は  $100^{\circ}\text{C}$  で温度差で  $4.75 \text{ mV}$  だから

$$\frac{16}{4.75} \div 3.36 \text{ 倍}$$

感度を上げ得て、 $0.1^{\circ}\text{C}$  の温度測定が容易になった。

熱電対は銅コンスタンタン線径  $1 \text{ mm}$  を使用銅導線としてビニール被覆単芯径  $1.6 \text{ mm}$  を使用。冷接点には魔法瓶に氷片を入れて使用し現場使用の状態即ち、銅コン線  $1.5 \text{ m}$ 、銅導線  $10 \text{ m}$  で検定曲線を描き、このグラフから測定温度を求めた。

### (b) 測定結果

#### (i) 8月5日の測定

夏に入り日射が強くなった状態で部材の箱形断面内の温度分布と気温の関係を求めると共に部材応力を測定した。

断面内の温度分布は次のグラフの通り。

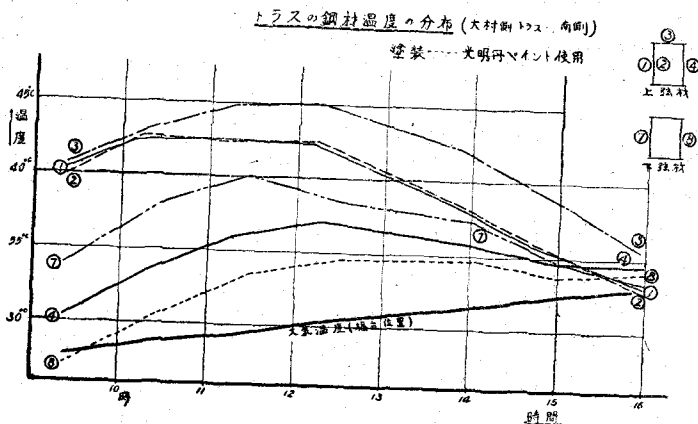


図 - 5

但し気温の測定結果を見ると16時迄上昇傾向のまゝであるがこれは橋台コンクリートの温度上昇による“照りかえし”の影響と判断される。尙この時はまだ上塗りペイントが塗られて居らず光明丹のまゝであり熱の吸収率の大きい時であつた。

上塗としてシルバーペイントを塗装後の9月17日の測定結果と比較すると面白い。本測定時の上、下弦材応力を示すと次のグラフの様になる。

大村側トラス上下弦材の目中の応力変化(8月5日)

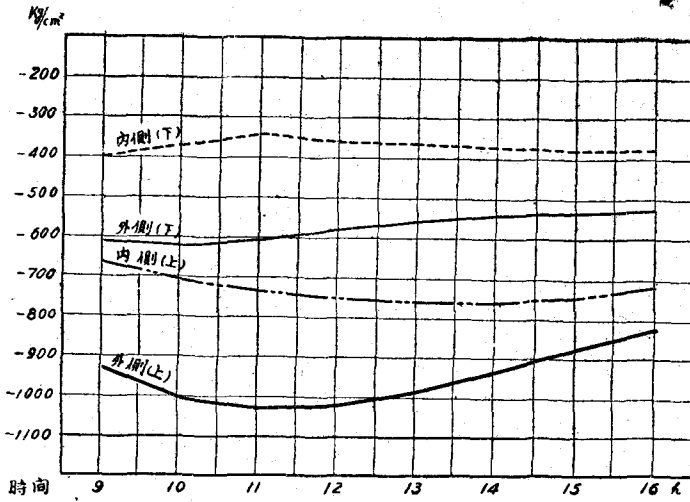


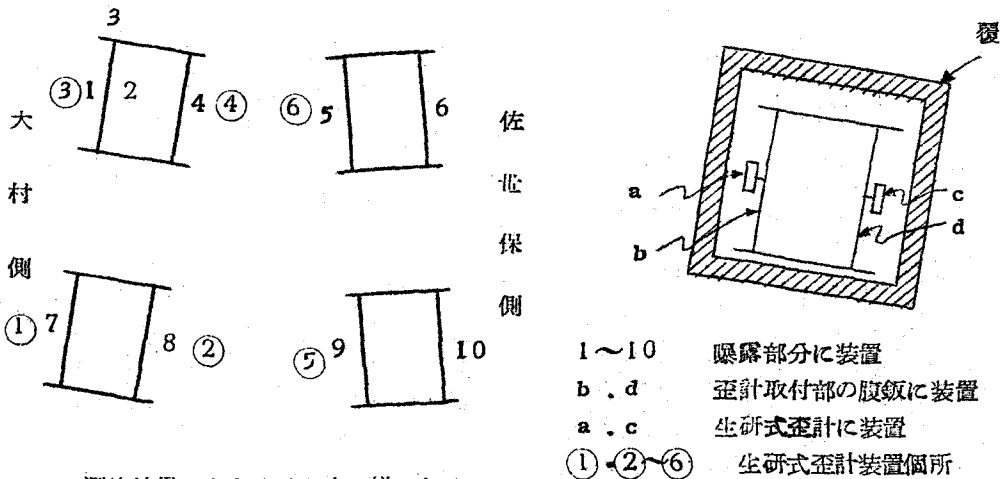
図 - 6

(ii) 9月17日の測定

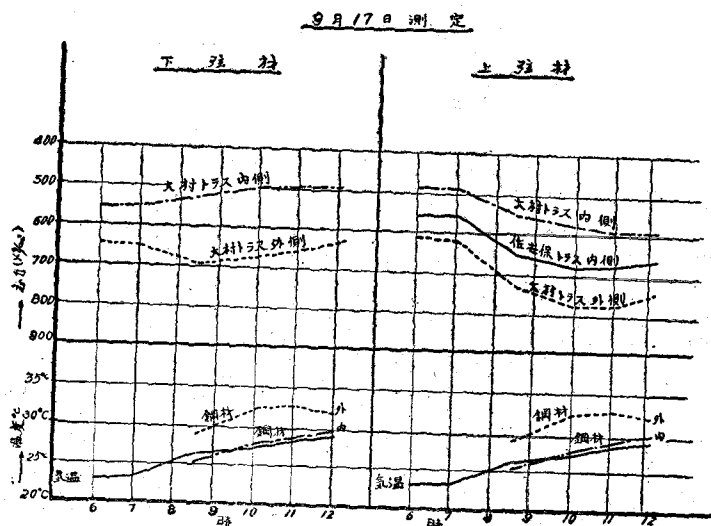
前回の報告に於てもふれたがダイヤルゲージ直読式のこの生研式歪計に於ては温度補償について疑点があつたので測定器本体と被測定母材の間に温度差が存在するかどうかを検し、それに関連して一連の測定を実施した。尙この時には上塗り塗装が行はれて居り、8月5日の測定結果と比較出来る。

熱電対及び生研式歪計の配置次図の如し。

図 - 7



測定結果をまとめると次の様になる。



測定器（生研式歪計）と被測定母材との間の温度差

| 個 所 |       | 時 間 | 8.30   | 10.00  | 11.00  | 12.00  |
|-----|-------|-----|--------|--------|--------|--------|
| 弦 材 | 測 定 器 |     | 24.00℃ | 28.75℃ | 29.70℃ | 30.00℃ |
|     | 被測定母材 |     | 24.00  | 28.70  | 29.70  | 30.00  |
| 内 側 | 測 定 器 |     | 25.25  | 29.00  | 30.75  | 31.00  |
|     | 被測定母材 |     | 25.25  | 29.25  | 30.75  | 31.00  |
| 外 側 | 測 定 器 |     | 25.25  | 29.00  | 30.75  | 31.00  |
|     | 被測定母材 |     | 25.25  | 29.25  | 30.75  | 31.00  |

以上の測定結果に明らかな如く温度差が認められず簡単な覆を作る事により温度補償の必要のない事が判る。

### § 3. 振動測定（動荷重応力の測定）

昭和30年10月8日から12日にかけて開通式直前に振動測定を行つた。

#### (i) 測 定 準 備

##### (a) 測 定 器

共和無線製DPM型抵抗線歪測定器（6成分）

##### (b) 測 定 点

アーチ部材の部材力影響線を知ると共に振動特性を知るために起拱点 $\frac{1}{4}$ 点及拱頂の5ヶ所にゲージを装着した。

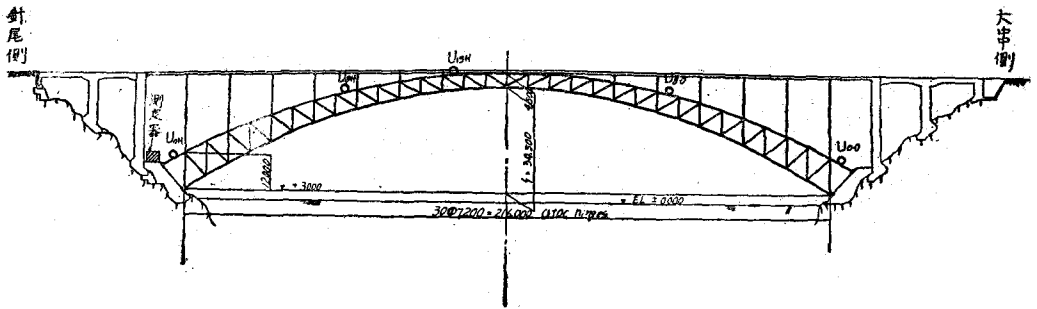


図 - 9

(c) ゲージ

ゲージはゲージレングス18mm、120Ωのベークライトゲージを使用し、温度補償はアクチブゲージに直角に貼ったダミーゲージに頼った。

断面内の貼布位置は上弦材上側蓋板の外側でワックスで被覆した。

(d) 接続コード

三芯のシールドキャブコネクタコードを使用し、コード延長は次の如くである。

$U_{0,H} : 10\text{ m}$        $U_{8,H} : 80\text{ m}$        $U_{13,H} : 120\text{ m}$   
 $U_{8,O} : 190\text{ m}$        $U_{0,O} : 250\text{ m}$

コードは箱形断面の中を通し、風等により測定中振動しない様にした。

(e) 走行荷重

13tダンプトラックに碎石を満載せしめた。

前輪 3,020 t      後輪 9,500 t      計 12,520 t

であつた。

(f) 測定

測定は最初ペーパー速度3.8cm/secで実施した。オシロのタイム自記マークの読取限度で遅くしたが、現像後測定結果を見るとまだ速度が速く波形がくずれるので速度を落とすと同時にタイムを電接時計により外部から入れて以後の測定を行つた。

自動車は定速度で運転させ中央径間への進入中央点位置退去を記録紙上にマークした。

測定結果のうち代表的なもの2例を掲載する。

この記録に記入した縦のスリットは0.5秒間隔に引いたものである。荷重ゲージは上から $U_{0H}$   $U_{8H}$   $U_{13H}$   $U_{8O}$ の順に記録されている。

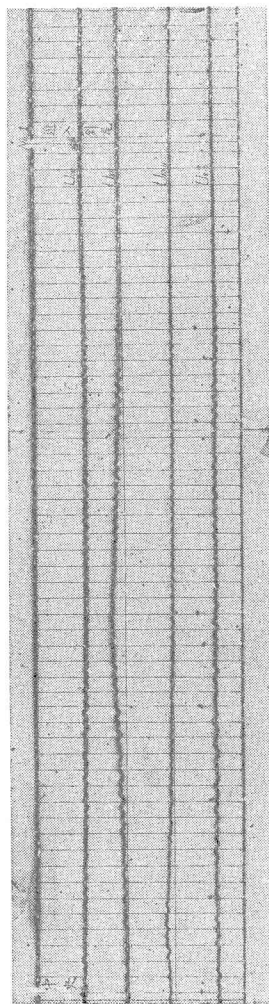
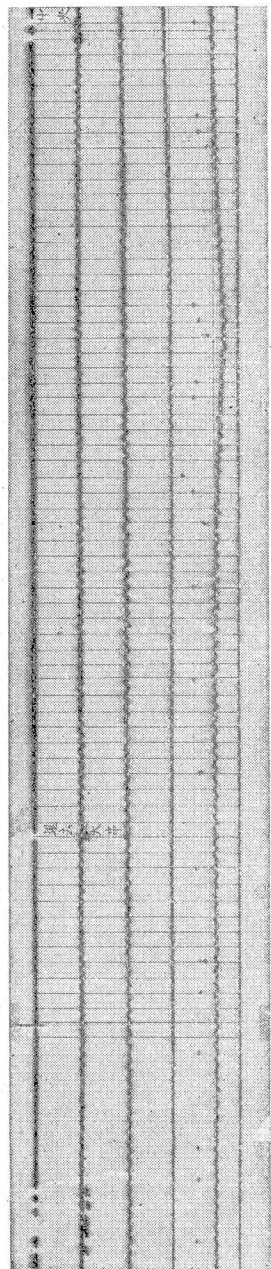


図 - 10 (測定番号 No. 1)

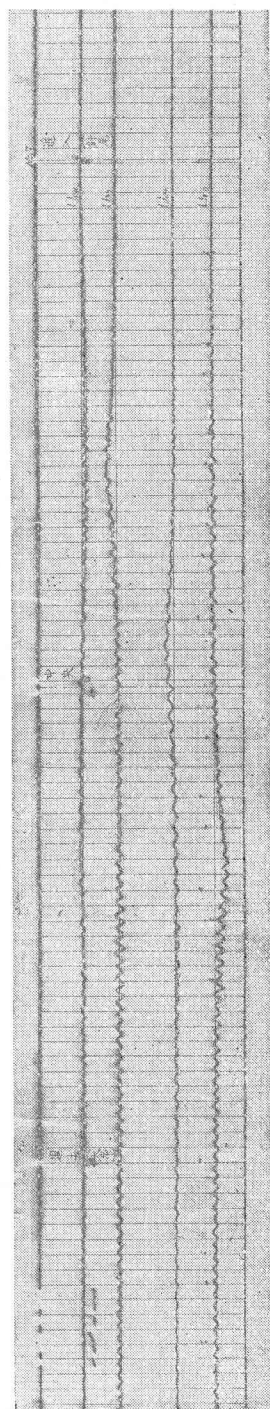


図 - 11 (測定番号 No. 7)

### (iii) 測定結果

#### (a) 動荷重による部材の最大応力と理論値の比較

| 資料                | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 平均   | 補正   | 計算値  |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| U <sub>8.H</sub>  | 24.2 | 17.1 | 17.5 | 17.4 | 18.4 | 17.2 | 15.1 | 16.1 | 18.4 | 17.7 | 17.2 |
| U <sub>8.O</sub>  | 14.5 | 17.5 | 18.2 | 18.1 | 17.0 | 17.2 | 17.4 | 15.1 | 16.9 | 20.1 | 17.2 |
| U <sub>13.H</sub> | 13.9 | 13.7 | 15.0 | 12.0 | 15.9 | 13.5 | 13.2 | 15.7 | 14.1 | 15.8 | 23H  |

単位  $Kg/cm^2$

コード延長の増大に伴い、U<sub>8.H</sub>は1.08、U<sub>13.H</sub>は1.12、U<sub>8.O</sub>は1.19倍が静取値に対する実歪量なので、それだけ補正した。

#### (b) 衝撃率

夜明け前の深夜、早朝測定が出来なかつたのでアーチは温度変化の影響を受け、温度の不均等分布の存在、温度応力の時間的変化が大きい等のため静的応力の測定は不可能だつた。最初測定点毎に荷重を橋外に退避させバランスを取つた後荷重を載荷し読み取り、再び荷重を退避させバランスを取る如き操作を繰り返したが温度の時間的変化の影響を消す事は出来なかつた。

従つてこゝで衝撃率と言うのは最大歪を生じた点に於てその点の動歪の平均を以て、静的歪と見なし

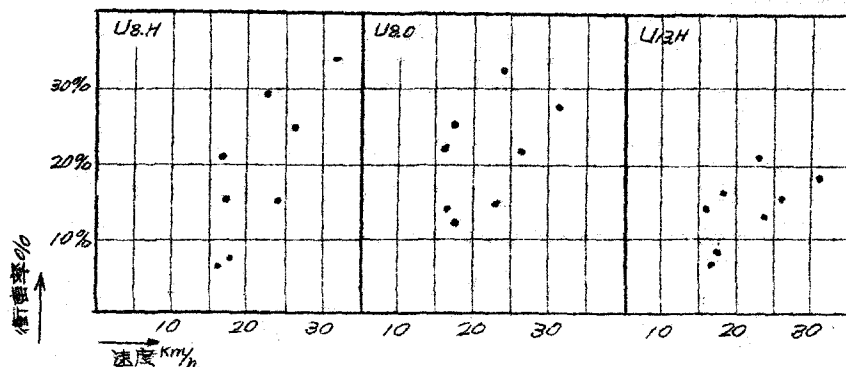
$$i = \frac{\text{最大歪} - \text{静的歪}}{\text{静的歪}}$$

で表わす。

この結果を表にまとめると次の様になる。

走行速度と衝撃率の関係

図—12



### (c) 減衰比

減衰比はこの場合定常的な波に於て或る波の振巾とそれより10番目の波の振巾の比を以て便宜上表はし測定結果について求めると次表の如くなる。

| 測点<br>データー | $U_{0.H}$ | $U_{8.H}$ | $U_{8.O}$ |
|------------|-----------|-----------|-----------|
| $M_0.1$    | 0.976     | 0.980     | 0.948     |
| $M_0.2$    | 0.973     | —         | 0.917     |
| $M_0.3$    | 0.982     | 0.963     | 0.943     |
| $M_0.7$    | —         | 0.910     | 0.915     |
| $M_0.8$    | —         | 0.960     | 0.925     |

平均 0.95

上記は定常波の得られたものについての結果である。

### (iv) 固有振動週期の計算値と実測値との比較

#### (a) 固有振動週期の計算

アーチの振動には拱頂に対して左右非対称及左右対称の振動型が存在する事は周知の通りである。

そして左右非対称の振動型は曲げモーメントによる振動であり、左右対称の振動型は拱軸の伸縮亦是曲げモーメントによる振動により、その時の振動条件により発生する。今一次振動だけをとりえてその振動型を考える時には拱頂に於ては拱軸の伸縮による左右対称振動を $\frac{1}{4}$ 点に於ては曲げモーメントによる左右非対称の振動を考慮することにする。

固定アーチの固有振動週期算出の厳密解は今の処出ていないがK.Federhoferは2つの自由度を有する境界条件を満足する変位 $u$ ,  $\omega$ として代数函数又は三角函数を用い等断面の両端固定円弧アーチの第一の固有円振動週期を算出している。

(Ingenieur Archiv 1933)

#### (i) Federhofer の式

円弧アーチとしての計算式であり、本橋は拋物線型なので換算円弧を求めた。

$$R = 204.07 \text{ m}$$

$\frac{1}{4}$ 点でこの円弧と拋物線の偏差0.41 mであつた。計算に必要な断面2次モーメ

ントは $\frac{1}{4}$ 点の $I$ が全体に通つていると見なして計算した。

起拱点、 $\frac{1}{4}$ 点、拱頂の $I$ は次の値である。

$$I_s = 13.05 m^4$$

$$I_{1/4} = 2.93 m^4$$

$$I_c = 1.57 m^4$$

○ 伸縮のない振動

$$\text{円振動数} \quad \omega = 8.00 \quad \text{周期} \quad T = \frac{2\pi}{8.00} = 0.787 \text{ 秒}$$

○ 伸縮を伴う振動

$$\text{円振動数} \quad \omega = 11.18 \quad \text{周期} \quad T = \frac{2\pi}{11.18} = 0.562 \text{ 秒}$$

(2) 自重による変位より勢力式を使用して固有振動周期を求める場合

トラスの垂直及水平の変位を $v, u$ とすれば

$$v = V_0 \cos \omega t$$

$$u = U_0 \cos \omega t$$

と置くことが出来る。

但し $V_0, U_0$ は各格点の正規型振動の振幅である。

$M_i \cdot g$ を格点に働く重量としこの自重による各格点の撓みを夫々正規振動の最大振幅と仮定すれば、この系の最大の位置エネルギーは

$$P = \frac{1}{2} \sum M_i \cdot g \cdot V_i$$

亦最大の運動エネルギーは

$$K = \omega^2 \left( \frac{1}{2} \sum M_i \cdot V_i^2 + \frac{1}{2} \sum M_i \cdot U_i^2 \right)$$

ここに $V, U$ は格点の自重による垂直並に水平変位である。

故に

$$\omega^2 = \frac{\sum M_i \cdot g \cdot V_i}{\sum M_i \cdot V_i^2 + \sum M_i \cdot U_i^2}$$

これによる近似解は左右対称の一次振動に対するもので然も自由度を制限しているので厳密解より大きい値を与えるであろう事が予期される。

以上の式から周期を計算すると

$$T = 0.548 \text{ 秒}$$

### (3) 2次基本振動数

測定結果から見ると1次の基本振動だけでなくそれより高い次数の振動が生じている様であるが、高次の振動数については今の処計算してないので2次アーチの振動から推定する。

本アーチの如き規模の2次アーチの振動数を計算するに拱軸の伸縮を伴はない曲げモーメントのみによる振動は

$$\text{1次基本振動周期 } T_1 = 1.23 \text{ 秒}$$

$$\text{2次基本振動周期 } T_2 = 0.525 \text{ 秒}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{2.35}$$

両端固定梁の場合の一次及2次の基本振動周期の比は

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{(4.730)^2}{(7.853)^2} = \frac{1}{2.76} \quad (\text{Timoshenko 工業振動学参照})$$

従つて予想される2次基本振動週期は

$$0.787 \text{ 秒} \times \frac{1}{2.35} = 0.335 \text{ 秒} \quad 0.787 \times \frac{1}{2.76} = 0.285 \text{ 秒}$$

の間にあるであろう。

### (b) 測定結果

| 測定番号<br>測点         | 1                                 | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|--------------------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| U <sub>0</sub> .H  | 0315 秒                            | 0325 | 0330 | 0330 | 0325 | 0520 | 0380 | 0365 |
| U <sub>13</sub> .H | 0330                              | 0345 | 0330 | 0590 | 0355 | 0560 | 0575 | 0590 |
| U <sub>8</sub> .H  | 0445                              | 0400 | 0425 | 0410 | 0410 | 0410 | 0415 | 0380 |
| U <sub>8</sub> .O  | 0405                              | 0400 | 0405 | —    | 0410 | 0420 | 0420 | 0400 |
| 走行速度               | 16.7 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ | 17.0 | 17.5 | 24.2 | 18.2 | 23.8 | 26.5 | 31.8 |

## § 4. 結 論

### (a) 長期応力の測定及死荷重応力について

- (1) 昭和29年9月から30年10月に至る迄1年余りにわたる測定の結果、ダイヤルゲージ直読型式の生研式歪計が途中殆ど故障なく動作し測定目的を達した。

部材に取りつけた10個の計器の裡1個のみ30年6月に故障した。故障の原因はダイヤルゲージ裏蓋金属の発錆粉により回転部の摩擦が増加した事による。

(2) 9月17日の測定に判る通り歪計本体と被測定母材との間に温度差は殆ど認められず、温度補償は十分行はれていると判断する。

(3) 表-1を見ると全死荷重載荷の時の応力が判るがアーチ閉合の際針尾側半アーチが大串側半アーチより50~80mm高く組み上つたのをお互に引き寄せて添接した結果起拱点の上弦材に対し針尾側に引張力、大串側に圧縮力が導入された事は、前回の報告に指摘したがその量がそのまゝ残り、結果的に見るとこの実測応力は許容応力を僅かに上廻っている。

#### (b) 温度応力及部材断面に於ける温度分布

(1) 図-5及図-9を見れば判る通り日照側と日蔭側の温度差は約10℃気温より約15℃高い値を示している。これに対し上塗りのシルバーペイントが塗られると気温より5℃高い程度に押さえられる事が判る。

#### (2) 温度応力

日中の温度分布は極めて不均等であるため計算によつて求められる均等温度変化に対応する値を示さない。従つて早朝日出前の測定データより死荷重が同じで測定温度の異なるものを抽出し求めてみる。

図-1及2に於て3月16日の測定と5月7日の測定の間には死荷重の変化が殆ど無いので応力の変化は温度変化によるものである。

鋼材の温度差 10.2℃

|             |        |    | 3/16測定                     | 5/7測定  | 応力差    | 1℃当り<br>温度応力 | 理論値   |
|-------------|--------|----|----------------------------|--------|--------|--------------|-------|
| 上<br>弦<br>材 | 大村トラス  | 内側 | $\text{kg/cm}^2$<br>-225.0 | -377.0 | -152.0 | -14.9        | -15.3 |
|             |        | 外側 | -328.6                     | -508.0 | -179.4 | -17.5        | "     |
|             | 佐世保トラス | 内側 | -282.4                     | -462.8 | -180.4 | -17.7        | "     |
|             |        | 外側 | -329.0                     | -274.0 | +55.0  | +5.4         | +6.9  |
| 下<br>弦<br>材 | 大村トラス  | 内側 | -329.0                     | -274.0 | +55.0  | +5.4         | +6.9  |
|             |        | 外側 | -405.4                     | -335.4 | +70.0  | +6.9         | "     |
|             | 佐世保トラス | 内側 | -392.0                     | -324.0 | +68.0  | +6.7         | "     |

図-7、8、9の結果を見れば日中の温度応力は温度分布の不均等の影響で曲げ換

りを受ける結果均等温度上昇と大分異つた値を示している。

特に下弦材に於ては日照側に於て温度の上昇と共に一時圧縮力を生じ暫くして本来の傾向として引張力を生じているがこの現象は温度上昇による膨脹が上方に逃げず直接支承に入る事を表はしている。

### (c) 振動実験について

振動実験は電気抵抗線歪計による歪振動の測定に頼つたが器械と貼布ゲージ迄の距離が200mを越した。

事前に十分調整を行い自信を持つて実施したが大串側の起拱点のゲージについては不安定な結果を示しデーターを取れなかつた。然しU8.0のコード延長190mの場合は良好に動作した。

(1) 動荷重による部材応力の変化は図-11、図-12の如く、その部材に対する影響線図とよく一致し、その最大応力は§3 (ii)の表を見ると $\frac{1}{4}$ 点のU8部材については殆ど理論値に近い値を示しているがU13は充分小さく出ている。これは拱頂部附近に於て床組による断面増と判断される。

(2) 単一走行荷重による衝撃率の走行速度との関係は図-13に示す如くである。2鉸アーチの万年橋の測定結果と比較すると約 $\frac{1}{2}$ 、亦支間50~60mの単純トラスの同様な測定値の $\frac{1}{2}$ 程度であり、衝撃係数は小さいものと判定される。

減衰比は0.95であつて、これは従来の測定結果(要補強橋の測定結果)の0.8~0.5と比較して、弾性が極めてよいものと判定される。

### (3) 固有振動週期

アーチの振動には拱頂に対し左右対称型のものと非対称型とがあるが、左右対称型の固有振動週期についてはFederhoferの円弧アーチとしての計算式(本橋を円弧と仮定する)によれば第一次振動に対し0.562秒、自重による各点の垂直並に水平変位により勢力式によれば0.548秒の理論値に対し、実測値はU13.Hにおいて走行速度20Km/hr以上の場合に0.560~0.590が記録された。

これ以下の速度では0.330~0.355と非対称型振動の2次基本振動週期0.335秒と思はれる振動をしている。

これは測点が拱頂より2格間づれてゐるために、後者の振動がよく記録されたためと推定される。又20Km/hrの走行速度の場合でも自動車が進入口初は0.3秒附近

の小さい振動で格点 10 附近以後において 0.56 秒程度の振動となつている。

非対称型の才 1 次基本振動週期の理論値は 0.787 秒才 2 次基本振動週期は 0.335 秒であつて、起拱点及び走行速度  $20 \text{ km/hr}$  以下の  $U_{13}$  (拱頂は格点 15 で  $U_{13}$  は格点 13 - 14 の部材である) においては 2 次振動週期に近い振動数が実測された。 $1/4$  点に近い  $U_8$  においては、2 次振動よりやや大きい  $0.40 \sim 0.42$  秒の週期が実測された。このアーチはフラットなアーチであつて、2 次振動が比較的に起こりやすいと推定される。