

伊ノ浦橋のアーチ主構の閉合について

建設省九州地建局 村 上 永 一

1. 固定アーチ閉合の理論

伊ノ浦橋の中央経間は支間216mの予応力を添加した固定構架アーチであつて、兩岸アーチ橋台より cantilever tieback system により「クラウン」迄架設されてた左右の半アーチ主構は設計される応力分布のアーチとして閉合されねばならない。

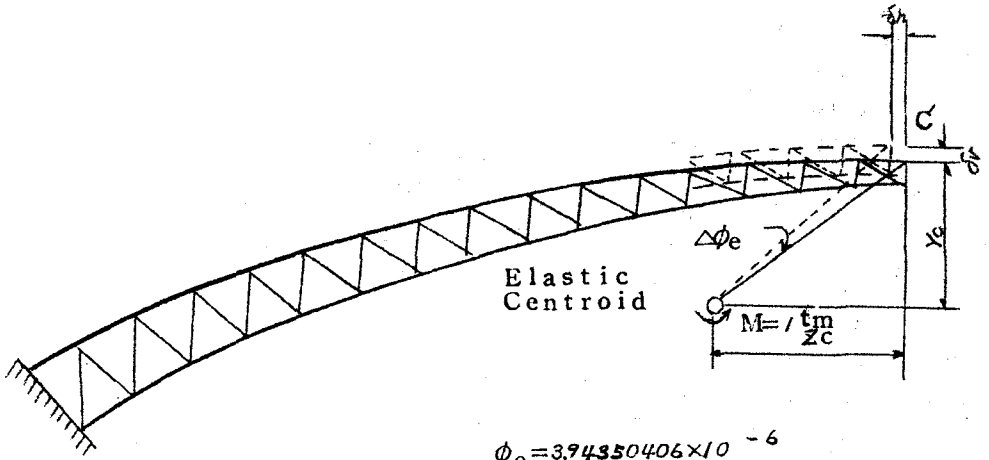
このことは兩岸より cantilever out (前方索のない状態で)アーチ主構の架設時死荷重による仮想の変位は閉合に当り「クラウン」に水平力とモーメントを作用せしめ、固定アーチの固有の位置に復元して、アーチ閉合を実施することである。現実にはこの水平力とモーメントと同等の効果をなす上弦側及下弦側の異つた水平力を添加するものであつて、これらを理論閉合並びに理論添加推力と名付けることとする。

本アーチ主構の理論閉合に当つて考慮せねばならない理論添加推力は次の2のものである。

I. 固定アーチの応力分布とするための理論推力

今半アーチ主構の架設時死荷重による変位を復元せしめるために、この弾性重心に水平力とモーメントを作用せしめる。半アーチ主構の弾性重心にモーメントを加えれば、弾性重心の特性より、その位置は変わらず、モーメントの腕は廻転する(この廻転は半アーチの「クラウン」垂直材の廻転と等しい)。

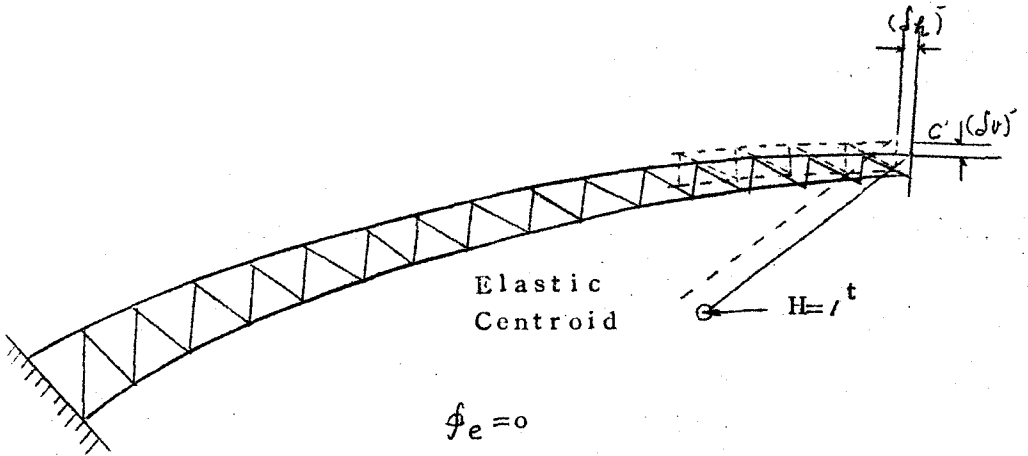
☒ - 1



$$\phi_e = 3.94350406 \times 10^{-6}$$

$$\int_{CHE}^v = +153.04816 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

$$\int_{CHE}^h = -334.3919 \times 10^{-4} \text{ cm}$$



$$\phi_e = 0$$

$$\int_{CHE}^v = +1.009290 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

$$\int_{CHE}^h = -341.1649 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

弾性重心に単位モーメントを加えたときのモーメントの腕の廻転角を ϕ_{eMe} とし、任意の格点の垂直変位を $\delta_m^v Me$ とする。又半アーチ主構のm点に単位垂直荷重が載つたときの弾性重心の腕の廻転角を ϕ_{ePm} とすれば、reciprocal theoryにより

$$\delta_m^v Me = \phi_{ePm} \quad (1)$$

Cantilever out した半アーチ主構の架設荷重 P_m による弾性重心の腕の廻転角は

$$\sum P_m \phi_{ePm} = \sum P_m \delta_m^v Me \quad (2)$$

この廻転角を復元するモーメントは

$$Me = \frac{\sum P_m \delta_m^v Me}{\phi_{eMe}} \quad (3)$$

$$= 3,257.654 \text{ tm}$$

又弾性重心に水平力を加えれば、弾性重心の腕は廻転せずに水平移動する。今弾性重心に単位水平力を作用したときのこの点の水平変位を $\delta_e^h He$ 、格点mの垂直変位を $\delta_m^v He$ とし格点の単位垂直荷重による弾性重心の水平変位を $\delta_e^h P_m$ とすれば同様に

$$\delta_e^h P_m = \delta_m^v He \quad (4)$$

Cantilever out した半アーチ主構の架設荷重 P_m による弾性重心の水平移動は

$$\sum P_m \delta_e^h P_m = \sum P_m \delta_m^v He \quad (5)$$

この水平移動を復元するための水平力は

$$He = \frac{\sum P_m \delta_m^v He}{\delta_e^h He} \quad (6)$$

$$= 474803 \text{ t}$$

この力を「クラウン」の midpoint O。に働く力に直すと

$$H_{Co} = 474803$$

$$M_{Co} = 3,257.654 - 474803 \times 6.20464 = 311.673 \text{ tm}$$

この力を添加するために「クラウン」の上下弦の夫々に300 t能力のジャッキ2台を部材の左右軸線と同じ位置に装置した。上下弦材の軸線間隔は4.55 mであるから、上記力をジャッキ推力に換算すれば

$$\text{上弦側理論推力 } P_{ud} = -\frac{474803}{2} - \frac{311.673}{4.55} = -305901 \text{ t}$$

$$\text{下弦側理論推力 } P_{ld} = -\frac{474803}{2} + \frac{311.673}{4.55} = -168902 \text{ t}$$

II 予応力添加のための理論推力

設計上各部材に所要の予応力を添加するため弾性重心に添加すべき力は

$$Me = 114,579 \text{ tm}$$

$$He = 68,210 \text{ tm}$$

であつて、之を上下弦の理論推力に換算すれば前項と同様にして

$$\text{上弦側理論推力 } P_{UP} = +33.728^t \quad (\text{引帳力})$$

$$\text{下弦側理論推力 } P_{LP} = -101.938^t$$

Ⅲ 閉合時の温度1℃上昇した場合の理論推力の補正

本アーチ主構の設計並に作業上の標準温度は15℃であつて、1℃の上昇した場合の半アーチ主構の「クラウン」垂直材の廻転角を $\phi_{c,t}$ 、「クラウン」上格点の水平変位を $\delta_{c,t}$ とすれば

$$M_e = - \frac{f_{c,t}}{f_c \cdot M_e} = +0.753904 \text{ tm}$$

$$H_e = - \frac{\delta_{c,t} - \delta_{c,t}^0 M_e}{\delta_{c,t}^0 H_e} = +4.06858^t \quad \left. \vphantom{\frac{\delta_{c,t} - \delta_{c,t}^0 M_e}{\delta_{c,t}^0 H_e}} \right\} \dots (7)$$

之を上下弦の理論推力に換算すると

$$\text{上弦側理論推力 } P_{UT} = -3.34816^t$$

$$\text{下弦側理論推力 } P_{LT} = +7.41674^t$$

従つて標準温度に於て理論閉合を実施するための理論推力は次の如くなる。

$$\text{上弦側理論推力 } P_{U0} = -272.173^t$$

$$\text{下弦側理論推力 } P_{L0} = -270.840^t$$

2. アーチ閉合の実施方式

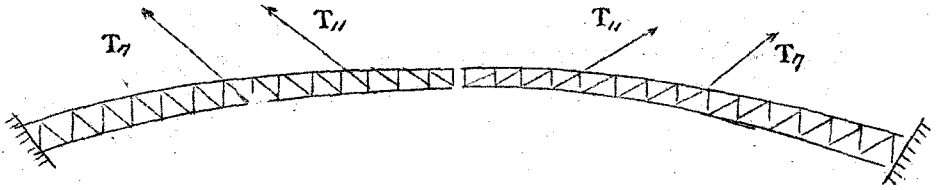
上記理論閉合をなすためには、架設の進行と云う現実の観点から、実施方式が種々異つて来るが、本橋の如く cantilever tieback system の場合にはアーチ主構に大きな架設応力が生じ、ケーブルの影響が極めて大きいから、簡単に理論閉合を行うことが出来ず、次の3の方式が考えられる。

I 直接法

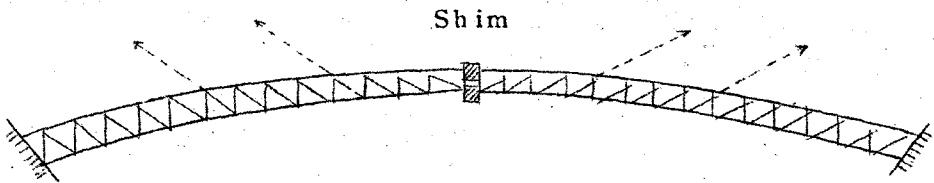
F.C.11 (格点11に取られる前方索)及F.C.7によつて支えられ「クラウン」迄架設された左右のアーチ主構の間に暫定楔を入れて、F.C.11及F.C.7を解除して、ケーブル張力の影響を除去した状態で理論推力を上下弦材間に添加する、即ち理論閉合そのものを実施する。

Direct - Method

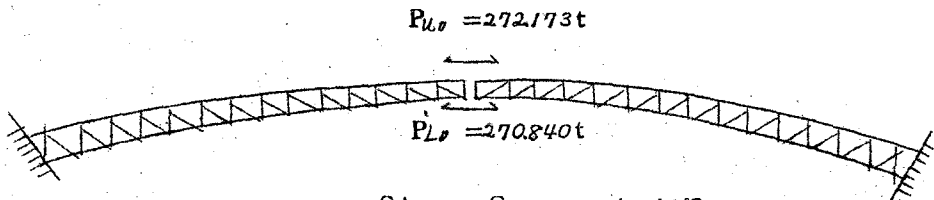
图 - 2



Stage C-1
Assembling Finish



Stage C-2
Forward cable release



Stage C-3 at 15°C
Upper & Lower Jacking at the same time

この方式は精度は向上するが暫定梗でケーブルを解除するとき、風圧その他不均等荷重が加わり「クラウン」に剪力を生じ、作業の危険が予想される。

II 交 番 法

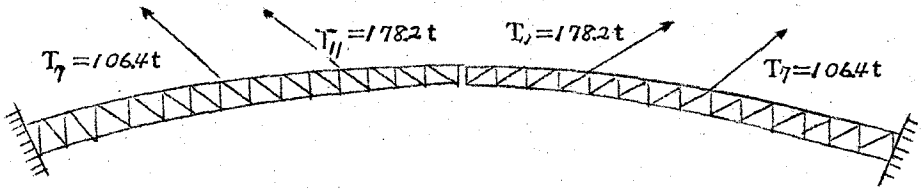
F.C.11 及 F.C.7 に張力のある状態で「クラウン」の上下弦に換算推力を添加してアーチを閉合する方式で、換算推力はこの推力が添加した場合の張力 T_H 及 T_A の理論減量に基き算定され、閉合作業後ケーブルを解除した後に理論推力が「クラウン」において生ずるようにするものである。この方式は作業はケーブルの取付られた状態で実施されるから安全であるが、ケーブルの張力の測定の誤差が閉合に最も多く入り、一方張力の理論減量はケーブルの特性上、実際減量と一致するものでないから、作業後張力を測定して、その補正を繰返し実施しなければならない。即ち作業は最も安全であるが精度の低下をまぬかれない。

III 準直接法

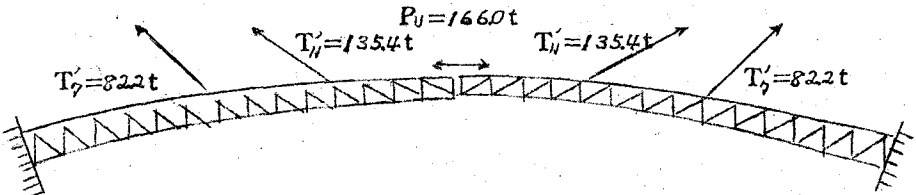
ケーブルのある状態 stage C-1において、「クラウン」上弦のみに換算推力を入れて、アーチを一鉸アーチとして閉合し、「クラウン」上格点を添接してからケーブルを解除し、下弦推力はケーブルのない状態で添加して、所期の固定アーチとする。これによれば作業も安全であり、上弦推力添加にはケーブルの張力の誤差が入るがその誤差を大きくない状態に保ち、下弦側推力の補正により、設計応力とほぼ同等の応力分布になすことが可能で、精度の向上も相当期待出来る。従つて伊ノ浦橋のアーチ閉合の実施方式は本法によつて行つた。

Semi-Direct-Method

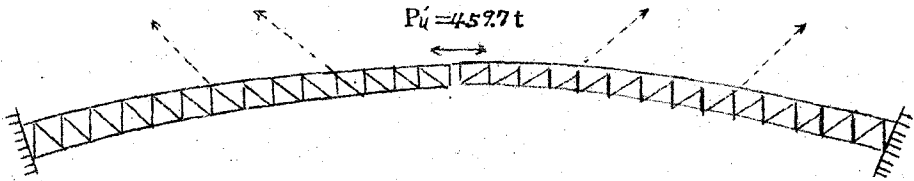
☒ - 3



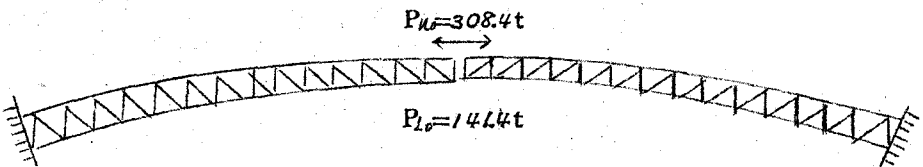
Stage C-1 at Δ/C
Assembling finish



Stage C-2 at Δ/C
Upper crown jacking



Stage C-3 at Δ/C
Forward cables release



Stage C-4 at $0/C$
Lower Crown jacking

3. 閉合における理論最終間隙量の利用

死荷重状態の如何に拘らず、正しいアーチ主構の形状が出来れば、そこに生ずる応力は設計されたものと等しくなる。即ち理論閉合が実施された場合の「クラウン」における左右半アーチ間の間隙量がアーチの正しい姿を決定するものであつてこれを最終理論間隙量と称す。

stage C-1における外力はF.C.11及F.C.7の張力と架設死荷重であり、一方stage C-4は理論閉合完成の姿であり、半アーチ主構に対する外力は架設死荷重と「クラウン」上下弦に作用する理論推力である。

今 stage C-1における左右半アーチの「クラウン」上格点C' 及下格点Cの実測間隙量を $\Delta c'$ 及び Δc とし、架設されたアーチ主構を無応力状態と仮定した場合の左右半アーチの「クラウン」の上下格点の仮想間隙量を Ic' 、 Ic とすれば

$$\begin{aligned}\Delta c' &= 2(\delta_c^R T_7 \cdot T_7 + \delta_c^R T_{11} \cdot T_{11} - \delta_c^R E_c) + Ic' \\ \Delta c &= 2(\delta_c^R T_7 \cdot T_7 + \delta_c^R T_{11} \cdot T_{11} - \delta_c^R E_c) + Ic\end{aligned} \quad (8)$$

stage C-4における理論推力を P_{uo} 、 P_{Lo} としその最終理論間隙量をとすれば

$$\begin{aligned}C_c' &= 2(\delta_c^R p_u \cdot P_{uo} + \delta_c^R p_L \cdot P_{Lo} - \delta_c^R E_c) + Ic' \\ C_c &= 2(\delta_c^R p_u \cdot P_{uo} + \delta_c^R p_L \cdot P_{Lo} - \delta_c^R E_c) + Ic\end{aligned} \quad (9)$$

(8)、(9) 式より未定値である仮想間隙量 Ic' 、 Ic を消去すれば

$$\begin{aligned}C_c' &= \Delta c' + 2(\delta_c^R p_u \cdot P_{uo} + \delta_c^R p_L \cdot P_{Lo} - \delta_c^R T_7 \cdot T_7 - \delta_c^R T_{11} \cdot T_{11}) \\ C_c &= \Delta c + 2(\delta_c^R p_u \cdot P_{uo} + \delta_c^R p_L \cdot P_{Lo} - \delta_c^R T_7 \cdot T_7 - \delta_c^R T_{11} \cdot T_{11})\end{aligned} \quad (10)$$

こゝに $\delta_c^R p_u$ 、 $\delta_c^R p_L$ 、 $\delta_c^R T_7$ 、 $\delta_c^R T_{11}$ は $p_u = 1/t$ 、 $p_L = 1/t$ 、 $T_7 = 1/t$ 、 $T_{11} = 1/t$ が半アーチ主構に夫々作用したときの格点Cの水平変位である。

依つて、stage C-4の最終理論間隙量はstage C-1とstage C-4との理論間隙量の差にstage C-1の実測間隙量を加へることにより求まる。更にstage C-1とstage C-4との理論間隙量の差は夫々のstageの外力による半アーチ主構の「クラウン」における変位の差の2倍である。

アーチの閉合において無条件にこの最終理論間隙量を入れることは次の欠点がある。理論間隙量を決定するためにはケーブルの張力測定の見誤差が入ること、外力による半アーチ主構の変位が実際のものと完全一致するとは保証されないこと。従つて後者に対しては弾性補正をする必要を生ずる。

然しながら、ジャツキによる推力のみでアーチ閉合を行うことは、作業上容易なものでなく、この最終理論間隙量の考えを利用して、何れの方法のアーチ閉合に於ても、目標とする間隙を与えておくことは極めて有効である。又理論間隙とジャツキ推力と差異が求まれば、理論間隙に対する弾性補正も可能となる。

依つて伊ノ浦橋アーチ閉合においては準直接法による方式を採用し、且つ理論間隙量の概念を活用して作業を進めた。

本橋の最終理論間隙量決定のため昭和29年12月21日午後10時半～11時半及び22日午前5時～6時にstage C-1における実測間隙量を測定した温度は8℃であつた。

この前日ケーブルの張力を測定し8℃に換算して次の値を得た。

$$\begin{array}{ll} \text{南側トラス} & T_{11} = 178.20^t \quad T_7 = 106.35^t \\ \text{北側トラス} & T_{11} = 173.45^t \quad T_7 = 106.55^t \end{array}$$

理論推力は8℃に換算すれば

$$\begin{array}{l} P_{U0} = 295.610^t \\ P_{L0} = 218.923^t \end{array}$$

となり次表の如く最終理論間隙量を決定した。

		stage C-1の 前方索張力に よる水平変位 (cm)	stage C-4の 理論推力に よる水平変位 (cm)	stage C-4と stage C-1の 理論間隙の差 (cm)	stage C-1 における実 測間隙量 (cm)	最終理論 間隙量 (cm)
南トラス	上弦側間隙	24.019	28.813	9.588	29.140	38.728
	下弦側間隙	19.465	22.772	6.614	29.210	35.824
北トラス	上弦側間隙	23.571	28.813	10.484	29.328	39.812
	下弦側間隙	19.110	22.772	7.324	29.610	36.934

尙お設計に於ては最終間隙量は320mmとし製作に当つて、死荷重、架設、予応力の夫々に対し垂直並に水平キャンパをつけて製作されたが結果的には上記の値となつた。

4. 上弦側ジャッキ圧力添加

stage C-1において半アーチ主構の「クラウン」上格点に $P_U = 1^t$ なる水平力が作用したときの前方索の張力の減量を ΔT_{11} 、 ΔT_7 とすれば、変位計算は

$$\begin{array}{l} \Delta T_{11} = -0.125549^t \\ \Delta T_7 = -0.234423^t \end{array}$$

stage C-2 における一鉸アーチにおいて前方索の張力1tの変化による 上弦側反力の変化を P_{UT7} 、 P_{UT11} とすれば

$$\begin{array}{l} P_{UT11} = -1.55432^t \\ P_{UT7} = -1.01085^t \end{array}$$

stage C-2 において添加すべきジャッキ推力 P_U は

$$\begin{aligned} P_{U0} + 0.756450 P_{L0} &= P_U + 1.55432 (T_{11} - 0.234423 P_U) \\ &\quad + 1.01085 (T_7 - 0.125549 P_U) \end{aligned}$$

$$\begin{array}{ll} 15^\circ \text{において} & \text{南側トラス } P_U = 188.337^t (6.1^\circ \text{ で } 140.07^t) \\ & \text{北側トラス } P_U = 202.411^t (6.1^\circ \text{ で } 154.14^t) \end{array}$$

12月23日午前3時～5時45分にかけて上弦側の最終理論間隙を与え、それに要するジャッキ推力を測定し次の値を得た。(鋼材温度6.1℃)

$$\text{南トラスで } 166.05^t \quad \text{北トラス } 178.13^t$$

これは理論値と大いに異なるように見えるが、この作業直後、前方索の張力を測定し南トラスに対し $T_{11} = 135.45^t$ $T_7 = 82.15^t$ 北トラスに対し $T_{11} = 130.10^t$

$T_7 = 81.15^t$ となり、之はケーブル張力が理論減量を示さなかつたことを示し、これにより理論値を補正し、作業人員の増を修正すれば

南トラスの理論値	164.29 ^t
北トラスの理論値	173.62 ^t

となり理論値と作業値と差は小さい。

補正作業

最終理論間隙量を決定するための、stage C-1における間隙量の測定時の温度を気温と同じ8℃としたが、上弦側推力添加作業の気温と鋼材温度測定結果より気温-2℃を適当と考え、この場合の理論間隙量は上弦側において0.5653cm下弦側において0.5599cmの減少となる。即ち0.56cm減少せしめたとすれば、ケーブルの張力の増加を理論値に仮定して、上弦圧力の作業値は夫々8.87^t減じ

南トラス	157.19 ^t	北トラス	169.26 ^t
------	---------------------	------	---------------------

之に対し理論値は夫々4.24^tを減じ

南トラス	160.05 ^t	北トラス	169.38 ^t
------	---------------------	------	---------------------

となり、理論値と作業値がよく一致するので4.6mmの補正を決定した。

一方北トラスにおいてトラスが15mm高いのと6℃における上弦理論推力300.972^tに対し作業値の最終値えの換算は306.640^tとなるのでこれが弾性補正を考え

$$\Delta c = 104.842 \times \left(1 - \frac{301.972}{306.640}\right) = 1.59^{mm}$$

を加え

南トラスの間隙量を5.6mm、北トラスは5.6+1.6=7.2mmだけ減量する補正作業を23日午後6時より実施した。

5. 下弦側ジャッキ圧力添加

上弦側ジャッキ圧力添加後、「クラウン」の上弦格点の添接を完了し、前方索をFC11 F.C.7の順に撤去して、完全な一鉸アーチとして、いよいよ下弦側の圧力添加作業に入った。

下弦側圧力添加時における理論推力は15℃でこの時の架設死荷重から

$$\text{上弦側理論推力 } P_{10} = 258.169^t$$

$$\text{下弦側 } P_{10} = 252.619^t$$

従つて下弦側ジャッキ圧力添加作業のための理論圧力は252.619^tとなる。

作限は30年1月7日午前3時より準備作限及諸測定を実施し5時~6時30分に圧力添加作業を実施した。

作業時の鋼材温度は0℃であつて、理論推力に温度補正とerection bentの控索張力の補正とを行えば

$$\text{理論推力は南トラス } 136.49^t \quad \text{北トラス } 135.73^t$$

之に対し最終理論間隙量となつたときのジャッキ推力は

$$\text{南トラス } 120.8^t \quad \text{北トラス } 120.8^t$$

このことは、アーチ主構の弾性補正で理論的に解決されるものでなく、上弦側に添加した圧力が過大に入っていると解釈せざるを得ない。この原因はstage C-1においてケーブルの張力をやや過少に測定されたため、最終理論間隙量がやや過大になつたものと考えらる。

上弦側の「クラウン」格点は既に添接鉋打を完了しているから、下弦側の格点の間隙量を

1 削減した場合の上下弦推力の変化 ΔP_U 、 ΔP_L は次の如くなる。

$$\Delta P_U = -8.483^t \text{ (圧縮力増加)}$$

$$\Delta P_L = +11.214^t \text{ (圧縮力減少)}$$

起拱点の上下弦材の応力の変化 ΔU_0 、 ΔL_0 は

$$\Delta U_0 = 5.3984^t \text{ (圧縮力減少)}$$

$$\Delta L_0 = -2.4088^t \text{ (圧縮力増加)}$$

下弦側 最終間隙量の補正方針

(a) 起拱点の上弦材 U_0 の長期応力測定結果によれば、針尾岸起拱点の U_0 の応力は理論値に一致するも、大串岸の U_0 の応力は理論より過大である。これは stage C-1 において大串岸アーチ主構の先端は針尾岸のそれに比較して南側トラス 51 北側トラス 74 あり、これを相互に修正したので、大串岸アーチは「クラウン」において上向きの剪力を針尾岸のそれは下向きの剪力を内部応力として生じ、左右岸の U_0 を理論値に補正することは不可能である。それ故にその平均値を理論値に近づけるよう下弦側間隙量を減少し U_0 の圧縮力を減少せしめる。

(b) 下弦側間隙量を減量すると U_0 の圧縮力が減少するため、針尾岸 U_0 の圧縮力は理論値より小さくなり、最悪の載荷状態で支承に引張反力を生じ、大串岸 U_0 の圧縮力は理論値に近づくが、この場合 U_0 部材の許容荷重の余裕値は 27^t であるから、その差を 27^t 以内にしたい。これにより上弦支承の一方には引張反力が生ずるが、他方の U_0 は許容応力以上の応力を受けることはなくなる。

(c) 下弦側間隙量を 1 減量すると上弦側反力は 8.48^t を増加するから下弦側間隙量の減量の限度は「クラウン」上弦材 U_{15} の許容荷重を越えないものでなければならない。 U_{15} 部材の許容荷重に対する余裕 58.55^t 、上弦側添加圧力の予想過大量 11.87^t より、減量限度は 5.5 (南側トラス) 5.6 (北側トラス) となる。

以上の3項を考慮して

下弦側最終理論間隙量を次の如く減量することに決し、7 日午後 5 時より補正作業を行った。

南トラス 4.4 北トラス 4.0

6. アーチ閉合結果

以上により伊ノ浦橋のアーチ主構は予応力を添加した固定構助アーチとして閉合が完了したが、その結果を判定するものとして、起拱点における上下弦材 U_0 及 L_0 の長期応力測定値を求め、アーチ閉合を完了した姿の死荷重応力理論値との差を求め、それにより予想される最大及最小を求めれば下記表の如くなる。これによれば実測応力と理論値との差はあつても、すべて部材の許容強度の余裕値以内で部材の許容強度を越したものは無い。

但し、針尾岸の上弦支承において 43^t 又は 30^t の引張反力を生ずるもので、これは上弦支承にアイバーが装置されてることにより充分抵抗出来る。

以上により設計にほぼ近い固定アーチ閉合の作業を実施し所期の目的を達成したものと判定される。

			実 測 値	理 論 値	架設と 完了時 の差	応力表の応力		完成後の実応力		部材許容強度	摘 要	
						最 大	最 小	最 大	最 小		許容強度	余裕
上弦材U。	針尾岸	側南トラス	-72.15	-119.1	+47.0	-740.9	-4.0	-693.9	+43.0	-767.7	+73.8	+43.0
		側北	-83.6	-118.0	+34.4	-740.9	-4.0	-706.5	+30.4	〃	+61.2	+80.4
	大串岸	側南	-131.9	-116.2	-15.7	〃	〃	-756.6	-19.7	〃	+11.1	生起せず
		側北	-143.3	-116.6	-26.7	〃	〃	-766.9	-30.0	〃	+0.8	〃
下弦材L。	針尾岸	側南	-432.5	-409.7	-22.8	-1062.2	-553.4	-1085.0	-576.2	-1182.6	+97.6	〃
		側北	-460.3	-410.8	-49.5	〃	〃	-1111.7	-602.7	〃	+70.9	〃
	大串岸	側南	-342.2	-411.3	+69.1	〃	〃	-993.1	-484.3	〃	+189.5	〃
		側北	-376.0	-411.4	+35.4	〃	〃	-1026.8	-518.0	〃	+155.8	〃