

三径間連続溶接トラス橋の二次応力と その変位に関する研究

正員 中村作太郎*

○万代良夫**

1. 緒 言

世界で最初に架設された溶接トラス橋は、1928年アメリカに架けられた Chicopee Falls 鉄道橋であり、その後各国に溶接トラス橋^{1)~3)}が架設されるようになったが、1938年ベルギーの Hasselt 橋、ドイツの Zoo および Rudersdorf 橋などの高張力鋼使用の溶接橋梁が破壊事故を起したことなども影響し、溶接橋梁の架設は全面的に一時影をひそめてしまった。しかし、終戦後急速なる溶接技術の進歩と共にその信頼度も高まり、トラス橋の主構にも次第に溶接が用いられるようになった。

我が国においても、最近道路橋、鉄道橋とも溶接断面トラス橋の実現が見られるようになった。しかしながら、部材連結部の溶接は構造的にも施工上においても種々問題点があり、トラス橋の完全溶接は未だ研究段階にあるといわなければならない。

部材の連結に際して考慮しなければならない最も重要な問題は、接手において応力の集中を出来るだけ避け、応力線の偏り、曲りなどをなるべく少なくすることにある。この必要は接手の静荷重に対する強さを増すことよりもむしろ疲労限度を高める点に重要性があり、静荷重を受ける構造物よりも橋梁のように動荷重を受ける構造物において特に重要である。従来の鋲接手では、その応力伝達の状況、持久性などに関しては、軟鋼にて形成された鋲の大なる靱性が局部的応力集中の緩和に大きな役割を果たすが、溶接接手における突合接手、隅肉接手はリベット構造に比し応力集中が大であり、且つ溶接によって内部応力が残留する傾向にある。この際外的拘束による残留応力は工作法によって出来るだけ避けることが出来るが、内的拘束による残留応力はどうしても避けられない。しかもその大きさは、場合によっては降伏点を越えることさえあるといわれている。この点溶接については充分なる注意と工夫が必要なのである。しかしその反面、次にあげる数多くの長所をもっている。

(1) 連結部分や接手部分の構造が簡単であり、普通、約15~20%の鋼材重量の節減が出来る。

(2) 溶接構造はリベット構造に比し、ほとんど完全に連続性のある構造物を作ることが出来る。

(3) 設計上の自由度が大である。

(4) リベック構造の場合のように、リベット孔の控除の必要がないことと継手効率が大きいこと。

(5) リベット構造における孔あけの工程を省くことが出来、また構造も簡易化し得るので工作が簡単である。

このように溶接トラス橋の利点は数え切れないほどあるが、溶接部における種々の研究問題に制圧され、我が国において特に衝撃の大なる鉄道橋としては、仲々全面的に使用されるまでに至らなかった。

最近溶接技術の進歩に確信が得られ、新幹線における相模川鉄道橋⁴⁾($L=3 @ 60 \text{ m}=180 \text{ m}$)その他に溶接トラス橋が登場するに至った。

著者等はこの相模川鉄道橋をモデル・ケースとして参照し、支間のそれより少しく大なる図-1に示すような三径間連続溶接トラス 鉄道橋 ($L=3 @ 78 \text{ m}=234 \text{ m}$) を試案設計した。トラスの格点部および継手は、新幹線の鉄道橋に用いたと同様溶接(工場)とリベット(現場)を混用して出来

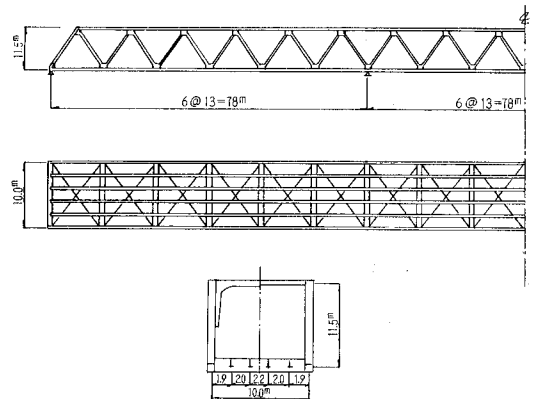


図-1 三径間連続溶接トラス橋一般図

* 室蘭工業大学 助教授

** " 助 手

る限りの慎重を期し、特に格点溶接部における二次応力とそのタワミにおよぼす影響を吟味研究した。

その格点変位については、節点を鉸と仮定せる場合の解法と節点剛性を考慮した場合の解法それぞれによって計算し、その差異を明かならしめた。

2. 設 計 要 項

- 1) 橋 種：複線鉄道橋
- 2) 型 式：三径間連続溶接トラス
- 3) 径 間：3 @ 78 m = 234 m (中央径間：6 @ 13 m = 78 m, 側径間：6 @ 13 m = 78 m)
- 4) 格 間 数：18
- 5) 橋 高：11.5 m
- 6) 幅 員：10.0 m
- 7) 活 荷 重：KS-18
- 8) 適用示方書
 - a. 鋼鉄道橋設計示方書 (同委員会, 昭和 31 年改正)
 - b. A.W.S 溶接道橋および鉄道橋の標準示方書 (アメリカ同委員会, 1947)
 - c. 溶接鋼鉄道橋設計示方書案 (同委員会, 昭和 39 年)
 - d. 高張力鋼鉄道橋設計示方書案 (同委員会, 昭和 39 年)
- 9) 許容応力度およびタワミの制限

許容応力度は、鋼鉄道橋設計示方書により、引張許容応力度 1,300 kg/cm², 圧縮許容応力度 1,200—0.05 (l/r)² kg/cm² を用い、タワミの制限規定には、やはり同設計示方書により $\delta = l/1000$ を準用した。
- 10) 最大等布荷重 (活荷重, 衝撃, 死荷重) : $w = 9.79 \text{ t/m}$

3. 部材応力と格点変位の計算

1) 反力, 剪断力および部材応力影響線

反力, 剪断力, 各部材の一次応力影響線を示せば, 図-2～図-7 のようになる。

2) 格点変の一般解法^{5), 6)} による計算式

図-8, 図-9 を参照し, 部材の断面積, 慣性モーメントその他計算に必要な諸数値をあげれば, 表-1, 表-2 の通りである。

いま, 図-8 のような格点数が n なるトラスを考える。総ての格点を鉸結であると仮定すれば, 任意の部材 hk の直線変形は次の式で与えられる。

$$\delta l_{hk} = (\delta x_k - \delta x_h) \cos \alpha_{hk} + (\delta y_k - \delta y_h) \cos \beta_{hk} \quad (1)$$

この部材の軸応力は

$$N_{hk} = \mu_{hk} \delta l_{hk} = \mu_{hk}$$

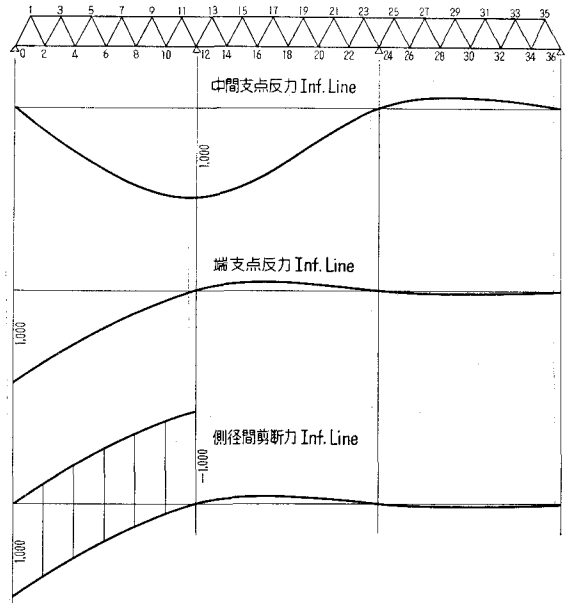
$$\{(\delta x_k - \delta x_h) \cos \alpha_{hk} + (\delta y_k - \delta y_h) \cos \beta_{hk}\} \quad (2)$$

平衡条件より一つの格点について次式が得られる。

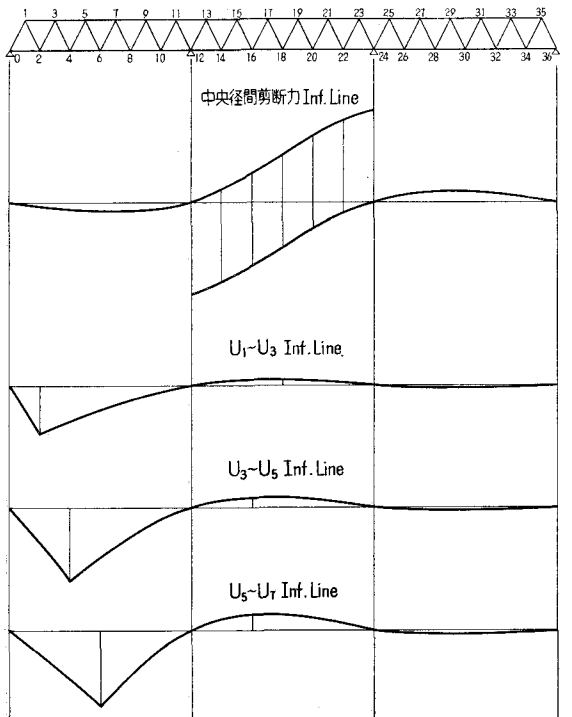
$$\left. \begin{aligned} \sum_h F_x &= 0 \text{ または, } \sum_h N_{hk} \cos \alpha_{hk} + P_h = 0 \\ \sum_h F_y &= 0 \text{ または, } \sum_h N_{hk} \cos \beta_{hk} + Q_h = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(3) 式は総ての格点について得られる。

(3) 式にて部材の軸応力は総て張力と仮定する。(3) の平衡方程式に (2) 式の N の値を代入し, $\delta x_k, \delta x_h, \delta y_k, \delta y_h$



図—2



図—3

をそれぞれ p_k, p_h, q_k, q_h なる記号にて表わせば, (3) 式は次のようになる。

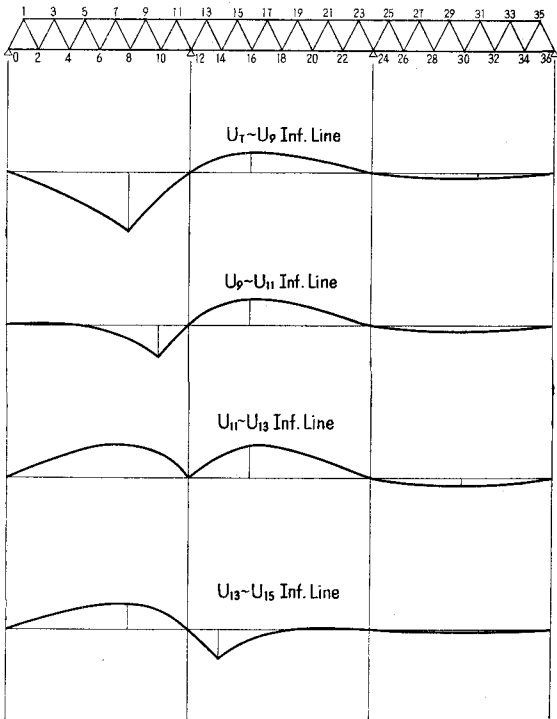


図-4

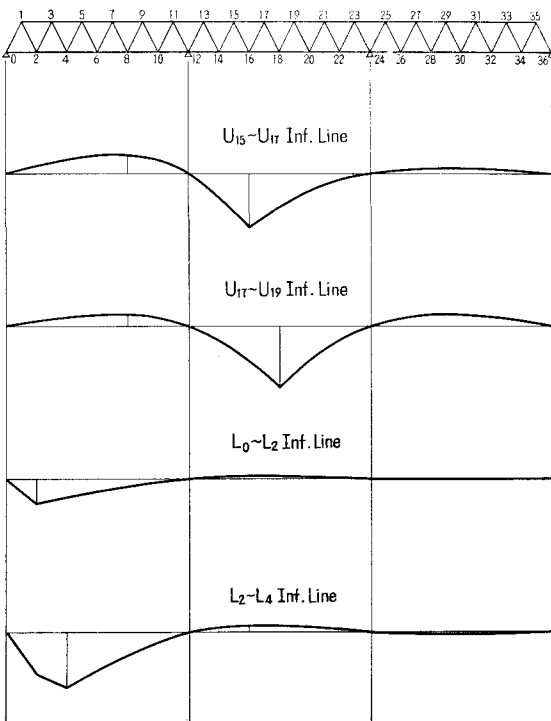


図-5

$$\left. \begin{aligned} \Sigma L_{hk} \\ \left\{ (p_k - p_h) \cos \alpha_{hk} + (q_k - q_h) \cos \beta_{hk} \right\} &= -P_h \\ \Sigma M_{hk} \\ \left\{ (p_k - p_h) \cos \alpha_{hk} + (q_k - q_h) \cos \beta_{hk} \right\} &= -Q_h \end{aligned} \right\} (4)$$

1 格点について (4) 式に示す 2 個の一次方程式を得る。

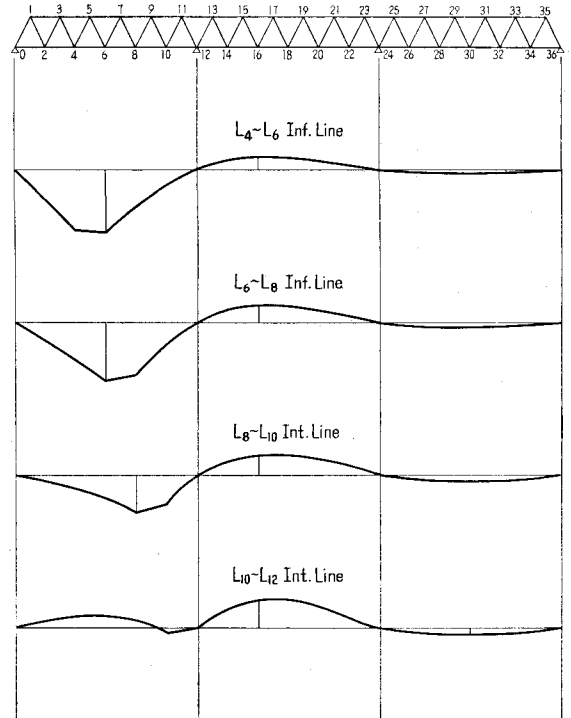


図-6

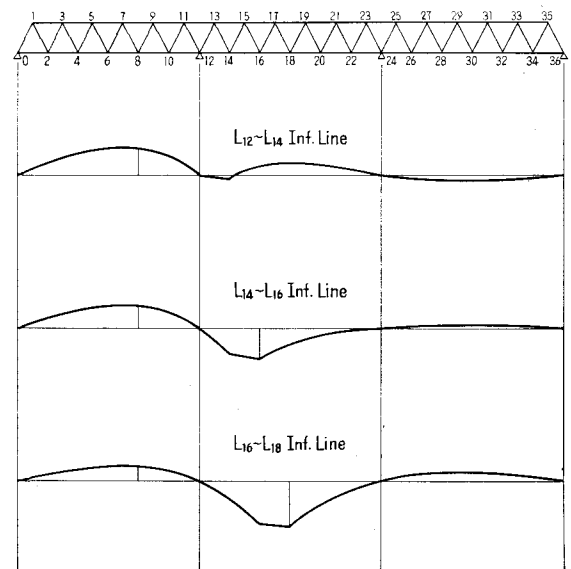


図-7

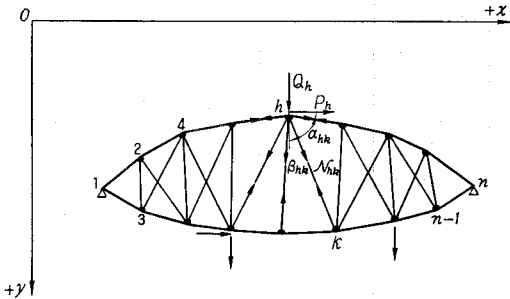
ら、これを全格点に適用することにより未知の格点変位の数と同数の方程式を得る。これを p, q についての一次連立方程式としてその解を求めれば、格点変位は次式の形で示される。

$$\left. \begin{aligned} p_h &= A_{h1}P_1 + A_{h2}P_2 + \cdots + A_{hn}P_n + C_{h1}Q_2 + B_{h2}Q_2 + \cdots + F_{hn}Q_n \\ q_h &= G_{h1}P_1 + H_{h2}P_2 + \cdots + J_{hn}P_n + B_{h1}Q_2 + B_{h2}Q_2 + \cdots + B_{hn}Q_n \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

または、

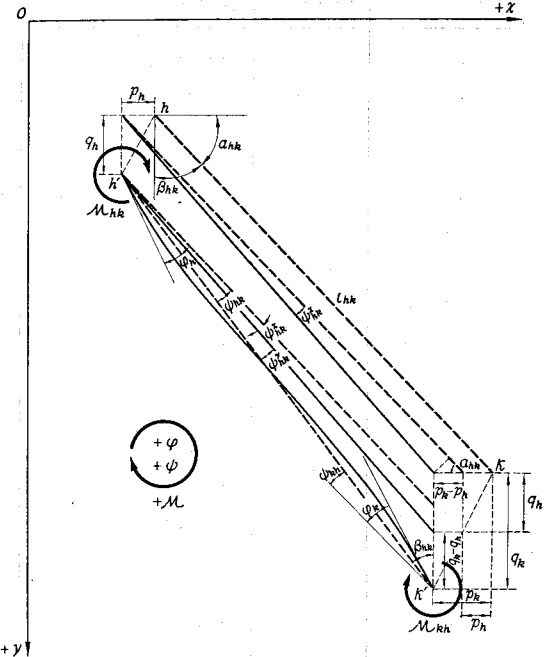
$$\left. \begin{aligned} p_h &= f_p(P, Q) \\ q_h &= f_q(P, Q) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

A, B, C などは荷重 P, Q の変位に対する影響値であ



図—8 一般トラスの記号図

る。そこで、いま 図-1 に示すような三径間連続トラス橋についてこの一般解式により、下弦材の各格点に垂直単一荷重 $Q=1\text{ kg}$ が作用するときの各格点の水平、垂直変位を



図—9 トラスの任意の部材における変位記号図

表 — 1

部 材	断 面 積 (cm ²)	慣 性 モ ー メ ン ト (cm ⁴)	cos α	cos β	μ _{hk} (kg/cm)	K _{hk} (kg-cm)	L (kg/cm)	M _{hk} (kg/cm)
上 弦 材 (l=13.00 m)					10 ⁸	10 ⁵		
U ₁ ~ U ₃	394.6	174585	1.0000	0.0000	637431	2.82022	6.37431	0.0000
U ₃ ~ U ₅	552.2	258105	"	"	892015	4.16939	8.92015	"
U ₅ ~ U ₇	552.2	258105	"	"	741138	3.27715	7.41138	"
U ₇ ~ U ₉	458.8	202871	"	"	741138	3.27715	7.41138	"
U ₉ ~ U ₁₁	321.2	124208	"	"	518862	2.00644	5.18862	"
U ₁₁ ~ U ₁₃	458.8	202871	"	"	741138	3.27715	7.41138	"
U ₁₃ ~ U ₁₅	321.2	124208	"	"	518862	2.00644	5.18862	"
U ₁₅ ~ U ₁₇	342.4	193376	"	"	553108	3.12377	5.53108	"
U ₁₇ ~ U ₁₉	376.0	163573	"	"	607385	2.64233	6.07385	"
下 弦 材 (l=13.00 m)								
L ₀ ~ L ₂	312.7	141201	1.0000	0.0000	505131	2.28094	5.05131	0.0000
L ₂ ~ L ₄	366.7	180795	"	"	592362	2.92053	5.92362	"
L ₄ ~ L ₆	416.2	216240	"	"	672323	3.49311	6.72323	"
L ₆ ~ L ₈	401.4	267127	"	"	648415	3.34590	6.48415	"
L ₈ ~ L ₁₀	302.5	139012	"	"	488654	2.24558	4.88654	"
L ₁₀ ~ L ₁₂	302.5	139012	"	"	488654	2.24558	4.88654	"
L ₁₂ ~ L ₁₄	347.2	169012	"	"	560862	2.64592	5.60862	"
L ₁₄ ~ L ₁₆	347.2	163795	"	"	488654	2.24558	4.88654	"
L ₁₆ ~ L ₁₈	302.5	139012	"	"	505131	2.28094	5.05131	"

表 - 2

斜 材 ($l=13.21$ m)

部 材	断 面 積	慣性モー メント	$\cos \alpha$	$\cos \beta$	μ_{hk}	K_{hk}	L_{kh}	M_{hk}
$L_0 \sim U_1$	410.2	208176	0.49205	-0.87055	6.52097	3.30938	3.20864	-5.67683
$U_1 \sim L_2$	304.4	169531	"	0.87055	4.83906	2.69504	2.38106	4.21264
$L_2 \sim U_3$	291.2	87673	"	-0.87055	4.62922	1.39374	2.27781	-4.03000
$U_3 \sim L_4$	223.6	78582	"	0.87055	3.55458	1.24922	1.74903	3.09444
$L_4 \sim U_5$	212.0	38254	"	-0.87055	3.37017	0.60813	1.65829	-2.93390
$U_5 \sim L_6$	212.0	38254	"	0.87055	3.37017	0.60813	1.65829	2.93390
$L_6 \sim U_7$	233.6	70428	"	-0.87055	3.71355	1.11960	1.87725	-3.23283
$L_7 \sim U_8$	291.2	87673	"	0.87055	4.16292	1.39374	2.27781	4.03000
$U_8 \sim U_9$	304.4	169531	"	-0.87055	4.83906	2.69504	2.38106	-4.21264
$U_9 \sim L_{10}$	376.2	126082	"	0.87055	5.98047	1.90892	2.94269	5.20630
$L_{10} \sim U_{11}$	376.2	120082	"	-0.87055	5.98047	1.90892	2.94269	-5.20630
$L_{11} \sim L_{12}$	479.8	244368	"	0.87055	7.62740	3.88473	3.75306	6.64003
$L_{12} \sim U_{13}$	440.8	214808	"	-0.87055	7.00742	3.41481	3.44800	-6.10031
$U_{13} \sim L_{14}$	331.0	125281	"	0.87055	5.21692	3.41481	2.56699	4.54159
$L_{14} \sim U_{15}$	321.8	102125	"	-0.87055	5.11567	1.62349	2.51717	-4.45345
$U_{15} \sim L_{16}$	223.6	78582	"	0.87055	3.55458	1.24922	1.74903	3.09444
$L_{16} \sim U_{17}$	224.0	39154	"	-0.87055	3.56094	0.62243	1.75216	-3.49168
$U_{17} \sim L_{18}$	200.0	42269	"	0.87055	3.17941	0.67195	1.56443	3.11757
$L_{18} \sim U_{19}$	200.0	42269	"	-0.87055	3.17941	0.67195	1.56443	-3.11751
$U_{19} \sim L_{20}$	224.0	39154	"	0.87055	3.56094	0.62243	1.75216	3.49168
$L_{20} \sim U_{21}$	223.6	78582	"	-0.87055	3.55458	1.24922	1.74903	-30.9444
$U_{21} \sim L_{22}$	321.8	102125	"	0.87055	5.11567	1.62349	2.51717	4.45345
$L_{22} \sim U_{23}$	331.0	125281	"	-0.87055	5.21692	3.41481	2.56699	-4.54159
$U_{23} \sim L_{24}$	446.8	214800	"	0.87055	7.00742	3.41481	3.44800	6.10031
$L_{24} \sim U_{25}$	479.8	244368	"	-0.87055	7.62740	3.88473	3.75306	-6.64003
$U_{25} \sim L_{26}$	376.2	120082	"	0.87055	5.98047	1.90892	2.94269	5.20630
$L_{26} \sim U_{27}$	376.2	126082	"	-0.87055	5.98047	1.90892	2.94269	-6.64003
$U_{27} \sim L_{28}$	304.4	169531	"	0.87055	4.83906	2.69504	2.38106	4.21264
$L_{28} \sim U_{29}$	291.2	87673	"	-0.87055	4.62922	1.39374	2.27781	-4.03000
$U_{29} \sim L_{30}$	233.6	70428	"	0.87055	3.71355	1.11960	1.82725	3.23283
$L_{30} \sim U_{31}$	212.0	38254	"	-0.87055	3.37017	0.60813	1.65829	-2.93390
$U_{31} \sim L_{32}$	212.0	38254	"	0.87055	3.37017	0.60813	1.65829	2.93390
$U_{32} \sim U_{33}$	223.6	78582	"	-0.87055	3.55458	1.24922	1.74903	-3.09444
$U_{33} \sim L_{34}$	291.2	87673	"	0.87055	4.62922	1.39374	2.27781	4.03000
$L_{34} \sim U_{35}$	304.4	169531	"	-0.87055	4.83906	2.69504	2.38106	-4.21264
$U_{35} \sim L_{36}$	410.2	208176	"	0.87055	6.52097	3.30938	3.20864	5.67683

p, q にて表わせば、表-3 (a), (b) のような 69 元連立一次方程式となる。

この 69 元連立一次方程式を北海道大学電子計算機センター所有の HIPAC-103 (株式会社日立製作所科学研究用電子計算機、記号 HISIP 103 B) にかけて解き、仮想仿の

原理によって求めた計算値について照査を行なった。その結果仮想仿の原理による計算値の妥当なことが確認されたので、タワミの比較に際しては仮想仿の原理によって求めた値を記載することとする。

3) 撓角分配法²⁾による二次応力と合成応力の算定

Williot Mohr の変位図を画いて、各部材の変長を計画し、更にその撓角分配率 r , Ed/l , Δ_m , 撓角 φ などを図上において計算し、 $M_{ab} = K_{ab}(2\varphi_a + \varphi_b + \phi_{ab})$ より二次モーメントを算出する。

二次モーメントが求まれば、二次応力度は $\sigma_{ab} = (M_{ab}/I_{ab}) \cdot y_{ab}$ より算出することが出来る。二次応力度は各部材の端部において、上、下にそれぞれ合計 4 個得られることになるから、これらの値を先に既に求めた一次応力度に代数的に加算すれば各部材における合成応力度が求まることになる。

それらの結果を許容応力度を割増 (1.5 倍) した値と比較し、更に一次応力と二次応力の比率を 100 分率で求めて見れば、表-4~表-6 のようになる。

4) 節点剛性の影響を考慮せるトラスのタワミ⁸⁾

任意の節点 i におけるトラスのタワミ一般解式は次のように示されることが出来る。

$$1 \cdot \delta_i = \sum \bar{S} S \mu \frac{s}{EA} + \sum \bar{M} M \nu \frac{s}{EI} + \kappa \sum \bar{Q} Q \lambda \frac{s}{GA} + \sum \bar{S} \varepsilon \mu s + \sum \varepsilon \frac{\Delta t}{h} \nu s \quad (7)$$

温度の変化によるタワミを無視すれば (7) 式右辺の第 4 項, 5 項を省けばよい。右辺の第 2 項 $\sum \bar{M} M \nu (s/EI)$ に二次モーメントによる影響である。

二次モーメントによるタワミを求めるには、 $M = 1/2 (M_{mn} + M_{nm})$, $\bar{M} = 1/2 (\bar{M}_{mn} + \bar{M}_{nm})$ を計算し、 $\sum \bar{M} M \nu (s/EI)$ に代入すればよく、 $\nu = 0.80$ として計算する。表-7 は、 $\sum (\bar{M} M / I) s$ の計算結果であり、これより下弦材各格点におけるタワミの総計が得られることになる。これを Williot Mohr の図解法によるタワミの分配率によって各格点に分配すれば、二次モーメントによる格点タワミが得られることになる。軸力のみによるタワミは $\sum \bar{S} S \mu (s/EA)$ において $\mu = 0.63$ として計算した。これらの計算結果を節点を鉸と仮定した一次応力のみによる仮想功の原理による計算結果と比較すれば、表-8 の通りになる。係数 μ , ν の値は既に行なった単純溶接トラスの模型実験による結果であるから三径間連続溶接トラスにおいては、いくらか異った係数になるかも知れない。

4. 考 察

1) 部材応力度について

撓角分配法における撓角 φ は、繰返し計算 5 回でよく収斂し、二次応力も可なり精度のよい結果が得られたように思う。二次応力は大部分の部材において一次応力の 10~70% を示した。一次応力の小さい部材では逆に二次応力の方が大きくなったものもあった (L_{16} - U_{17} 部材)。

溶接トラス橋では当然二次応力を加味した合成最大応力

によって断面を決定すべきであり、その意味において本研究の結果が参考になれば幸いである。許容応力度を 1.5 倍し、引張許容応力度で $1,950 \text{ kg/cm}^2$, 圧縮許容応力度で、上・下弦材では最小 $-1,473 \text{ kg/cm}^2$, 最大 $-1,582 \text{ kg/cm}^2$, 斜材では最小 -779.4 kg/cm^2 , 最大 $-1,713 \text{ kg/cm}^2$ であった。

これらに比べ、各部材の合成実応力度は、二、三の部材を除き許容応力度以下であり、しかも不経済な断面を有する部材はなく合理的な断面が得られたものと思う。

許容応力度を少しく超過した部材は、斜材 L_6 - U_7 , L_{10} - U_{11} , L_{16} - U_{17} の三部材だけであり、問題とするほどではなかった。高張力鋼⁹⁾を使用すれば更に経済的な断面が得られると思う。二次応力を加算した場合の許容応力度の割増率は鋼材の物理的性質によりもっと増加してもよいのではないかと考えられ研究の余地があるものと思う。

2) 格点変位について

節点を鉸と仮定して求めた値 (仮想功の原理によるもの) は、節点剛性の影響を考慮して求めた値に比べ、約 15% 程度大きくなるが、これは妥当な結果であるように思われる。節点剛性の影響を考慮した場合の係数 μ , $\nu^{10), 11)}$ のとり方には種々問題があると思うが、相似形の模型実験でもやらない限りこの程度の値を用いるよりないと思う。

また一般解法によって求めた値は、仮想功の原理によって求めた値より少しく小さくなる傾向にあったが精度がよければ一致するものと考えられたので、表-8 には仮想功の原理によって求めた値のみを記載した。しかし、厳密に格点変位を求めるには、節点剛性と変形の影響を考慮した厳密一般解法¹²⁾によって連立方程式を誘導し、電子計算機利用によって求めた方が更に正確な変位が得られるのではないかと推察する次第である。

5. 結 言

計算結果より三径間連続溶接トラス鉄道橋の二次応力は無視出来ない値なることがわかったので設計計算としても二次応力をとり入れ、力学的経済性において優れた断面を選定すべきことを強調するものである。

またその最大タワミについては、相似形の模型実験によって節点剛度に関する係数 μ , ν などを決定し、厳密タワミ計算法の利用を推奨するものであり、更に電子計算機利用による節点剛性と変形の影響を考慮せる厳密一般解法の計算も今後に与えられた研究課題であると思う。

最後に本研究の設計に御協力下さった、室蘭工業大学土木工学科卒業生梅田広隆君に心からお礼を申上げる次第である。

表-3(a) トラスの格点変位方程式

69元連立																			
	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₁₅	P ₁₆	P ₁₇	P ₁₈
1	1.5788	4.1242	1.1711	6.3743															
2	5.0513	1.1711	10.2668	1.1208	5.9236														
3		6.3743	1.1208	17.2758	0.8606	8.9201													
4			5.9236	0.8606	14.3234	0.8159	6.7232												
5			8.9201	0.8159	17.9728	0.8159	7.4113												
6					0.8159	14.9224	0.8991	6.4841											
7					6.7232	0.8991	16.8426	1.1208	7.4113										
8						6.4841	1.1208	13.4630	1.1716	4.8865									
9							7.4113	1.1716	15.2195	1.4479	5.1886								
10								4.8865	1.4479	12.6689	1.4479								
11									5.1886	1.4479	15.8946	7.4113							
12										4.8865	1.4479	1.4965	5.6686						
13											7.4113	15.5596	1.2630	5.1886					
14												1.2630	13.7180	1.2385	5.6086				
15												5.8061	4.2385	12.8188	0.8606	5.5210			
16													4.8865	0.8606	12.1403	0.8621	0.7697		
17														5.5310	0.8621	12.1403	5.5311		
18															5.0513	0.8621	11.6420		
19																6.0738	0.7497		
20																	5.5210		
21																			
22																			
23																			
24																			
25																			
26																			
27																			
28																			
29																			
30																			
31																			
32																			
33																			
34																			
35																			
36		0.7204	2.0728																
37		2.0728	0.0898	-1.9829															
38			-1.9829	0.4603	1.5226														
39				1.5226	-0.0789	-1.4436													
40					-1.4436	0.0000	1.4436												
41						1.4436	0.1470	-1.5907											
42							-1.5907	-0.3922	1.9829										
43								1.9829	0.0898	-2.0728									
44									-2.0728	0.4889	2.5617								
45										2.5617	0.0000	-2.5617							
46											-2.5617	-0.7054							
47													0.7669	2.2346					
48													2.2346	0.1493	-2.1913				
49														2.1913	0.6687	1.5226			
50															1.5226	0.1355	-1.7181		
51																	-1.7181	-0.2841	1.5340
52																		1.5340	0.0000
53																			-1.5340
54																			
55																			
56																			
57																			
58																			
59																			
60																			
61																			
62																			
63																			
64																			
65																			
66																			
67																			
68																			
69																			

(注) 格点変位の単位: CM (係数 10^{-5})

(下弦材の各格点に単一荷重 1kg 同時載荷)

方 程 式																	
P ₁₉	P ₂₀	P ₂₁	P ₂₂	P ₂₃	P ₂₄	P ₂₅	P ₂₆	P ₂₇	P ₂₈	P ₂₉	P ₃₀	P ₃₁	P ₃₂	P ₃₃	P ₃₄	P ₃₅	
																	1
																	2
																	3
																	4
																	5
																	6
																	7
																	8
																	9
																	10
																	11
																	12
																	13
																	14
																	15
																	16
6.0738																	17
0.7697	5.4513																18
-13.7368	0.8671	5.5310															19
0.8671	-12.1403	6.8606	4.8865														20
5.5310	0.8606	-12.8188	1.2385	5.1886													21
	5.6086	1.2385	-13.7189	1.2430	5.6086												22
		5.1886	1.2630	-15.5596	1.6965	7.4113											23
			5.6686	1.6965	-14.0984	1.0466	4.8865										24
				7.4113	1.8466	-13.8946	1.4479	5.1886									25
					4.8865	1.4479	-15.2195	1.1716	7.4113								26
						5.1886	1.4479	-12.6689	1.4479	4.8865							27
							4.8865	1.1716	-13.6630	1.1208	6.4841						28
								7.4113	1.1208	-14.8421	0.8991	0.7232					29
									6.4841	0.8991	-14.9224	0.8159	0.7232				30
										7.4113	0.8159	-17.9728	0.8159	8.9295			31
											6.7232	0.8159	-19.3234	0.8606	5.9236		32
												8.9295	-17.2758	1.1208	4.3793		33
													5.9236	1.1208	-12.2469	1.1711	34
														6.3743	1.1711	-9.1242	35
																	36
																	37
																	38
																	39
																	40
																	41
																	42
																	43
																	44
																	45
																	46
																	47
																	48
																	49
																	50
																	51
-1.5340																	52
0.2841	1.1181																53
1.7181	-0.1355	-1.5226															54
	-1.8226	-0.6687	2.1913														55
		2.1913	-0.1433	-2.2346													56
			-2.2346	-0.7667	3.0016												57
					-3.2672	6.7054	2.5617										58
						2.5617	0.0000	-2.5617									59
							-2.5617	0.6889	2.0728								60
								2.0728	-0.0898	-1.9829							61
									-1.9829	0.3922	1.5917						62
										1.5917	-0.1470	-1.4436					63
											-1.4436	0.0000	1.4436				64
												1.4436	-1.4436				65
													-1.5226	-0.6687	1.9829	2.0728	66
														1.9829	-2.0728	0.7204	67
																2.5535	68

表-3(b) トラスの格点変位方程式

69元連立																			
	P ₂₆	q ₁	q ₂	q ₃	q ₄	q ₅	q ₆	q ₇	q ₈	q ₉	q ₁₀	q ₁₁	q ₁₂	q ₁₃	q ₁₄	q ₁₅	q ₁₆	q ₁₇	q ₁₈
1		0.7264	2.0728																
2		2.0728	-0.0898	-1.9829															
3			-1.9829	0.4683	1.5226														
4				1.5226	-0.0790	-1.4436													
5				-1.4436	0.0000	1.4436													
6					1.4436	0.1470	-1.5907												
7						-1.5907	0.3922	1.9829											
8							1.9829	0.0898	-2.0728										
9								2.0728	0.4889	-2.5617									
10									2.5617	0.0000	-2.5617								
11										-2.5617	-0.7654								
12											3.2672	-3.4416							
13												0.7649	2.2347						
14													2.2347	-0.1433	-2.1913				
15														2.1913	0.6687	1.5226			
16															1.5226	0.0072	-1.5253		
17																1.5253	0.1635	1.3618	
18																	1.3618	0.0000	1.3618
19																		-1.3618	
20																			
21																			
22																			
23																			
24																			
25																			
26																			
27																			
28																			
29																			
30																			
31																			
32																			
33																			
34																			
35	5.0513																		
36	1.5788																		
37		-2.6092	3.6673																
38		3.6673	-7.1756	3.5083															
39			3.5083	-9.2021	2.6938														
40				2.6938	-5.2479	2.5541													
41					2.5541	-8.1882	2.5541												
42						2.5541	-5.3684	2.8134											
43							2.8134	-6.3226	3.5083										
44								3.5083	-7.1356	3.6673									
45									3.6673	-8.1996	4.5323								
46										4.5323	-9.2646	4.5323							
47											4.5323	-10.3120							
48												-7.2643	3.9536						
49												3.9536	-7.8306	3.8769					
50													3.8769	-6.5708	2.4738				
51														2.4738	-4.1855	3.4716			
52															3.4716	-6.2056	2.7140		
53																2.7140	-5.4280		
54																	2.7140		
55																			
56																			
57																			
58																			
59																			
60																			
61																			
62																			
63																			
64																			
65																			
66																			
67																			
68																			
69																			

(注) 格点変位の単位: CM (係数 10⁻⁵)

(下弦材の各格点に単一荷重1kg同時載荷)

方 程 式																	足数块	
g ₁₉	g ₂₀	g ₂₁	g ₂₂	g ₂₃	g ₂₄	g ₂₅	g ₂₆	g ₂₇	g ₂₈	g ₂₉	g ₃₀	g ₃₁	g ₃₂	g ₃₃	g ₃₄	g ₃₅		
																	0	1
																	0	2
																	0	3
																	0	4
																	0	5
																	0	6
																	0	7
																	0	8
																	0	9
																	0	10
																	0	11
																	0	12
																	0	13
																	0	14
																	0	15
																	0	16
																	0	17
13618																	0	18
-0.1635	1.5253																0	19
1.5253	0.0027	-1.5226															0	20
	-1.5226	-0.6687	2.1987														0	21
		2.1987	0.1433	-2.2347													0	22
			-2.2347	-0.7669													0	23
				3.0016													0	24
					3.2672												0	25
					0.7054	2.5617											0	26
						2.5617	0.0000	-2.5617									0	27
							-2.5617	0.4889	2.0728								0	28
								2.0728	-0.0898	-1.9829							0	29
									-1.9829	0.3922	1.5907						0	30
										1.5907	-0.1470	-1.4436					0	31
											-1.4436	0.0000	1.4436				0	32
												1.4436	-1.5226	-0.7900			0	33
													-1.5226	0.4603	1.9829		0	34
														1.9829	0.0898	-2.0728	0	35
															-2.0728	-0.7264	0	36
																	0	37
																	-1 (10 ⁻⁵)	38
																	0	39
																	-1 (10 ⁻⁵)	40
																	0	41
																	-1 (10 ⁻⁵)	42
																	0	43
																	-1 (10 ⁻⁵)	44
																	0	45
																	-1 (10 ⁻⁵)	46
																	0	47
																	-1 (10 ⁻⁵)	48
																	0	49
																	-1 (10 ⁻⁵)	50
2.7140																	0	51
-6.2050	3.4916																-1 (10 ⁻⁵)	52
3.4916	-6.1855	2.6938															0	53
	2.6738	-6.5708	3.8767														-1 (10 ⁻⁵)	54
		3.8767	-7.8306	3.7536													0	55
			3.7536	9.2643													-1 (10 ⁻⁵)	56
					10.3128	4.5323											0	57
					4.5323	-7.0640	4.5323										0	58
						4.5323	-0.1776	3.6675									-1 (10 ⁻⁵)	59
							3.1673	-7.1356	3.5083								0	60
								3.5083	-6.3226	2.8143							-1 (10 ⁻⁵)	61
									2.8143	-5.3684	1.4436						0	62
										1.4436	-3.1082	2.5541					-1 (10 ⁻⁵)	63
											2.5541	-5.2677	2.6938				0	64
												2.6938	-7.2021	3.5083			-1 (10 ⁻⁵)	65
													3.5083	-7.1754	3.6673		0	66
														3.6673	-8.6072		-1 (10 ⁻⁵)	67
															4.5946		0	68
																	0	69

表 — 4

上弦材	格点	一次応力 σ_P (kg/cm ²)	二次応力 (kg/cm ²)		$\frac{\sigma_S}{\sigma_P} \times 100$	合成応力 σ (kg/cm ²)		許容応力 σ_{al} (kg/cm ²)	
			(上)	(下)		(上)	(下)	圧 縮	引 張
U ₁ ~ U ₃	1	-886.9	-489.1	648.7	62.2	-1,376.0	- 238.2	-1,504.2	1,950.0
	3		-551.3	731.1		-1,438.2	- 155.8		
U ₃ ~ U ₅	3	-960.3	- 10.9	14.1	26.9	- 971.2	- 946.2	-1,492.8	"
	5		-258.5	332.6		-1,218.8	- 627.7		
U ₅ ~ U ₇	5	-984.7	27.8	-35.9	26.3	- 956.9	-1,020.6	-1,492.8	"
	7		-259.2	333.7		-1,243.9	- 651.0		
U ₇ ~ U ₉	7	-887.6	-104.7	135.0	11.8	- 992.3	- 752.6	-1,476.3	"
	9		- 78.5	60.9		- 966.1	- 826.7		
U ₉ ~ U ₁₁	9	590.3	75.8	-102.4	98.6	666.1	487.9	-1,473.0	"
	11		-480.6	581.6		109.7	1,171.9		
U ₁₁ ~ U ₁₃	11	1,026.8	483.8	-622.3	47.1	1,510.6	404.5	-1,476.3	"
	13		-229.9	296.4		796.9	1,323.2		
U ₁₃ ~ U ₁₅	13	655.0	-407.4	49.3	7.54	247.6	704.3	-1,473.0	"
	15		- 4.0	4.9		651.0	659.9		
U ₁₅ ~ U ₁₇	15	-878.3	-155.6	185.4	49.4	-1,033.9	- 692.9	-1,523.7	"
	17		364.2	-433.9		- 514.1	-1,312.2		
U ₁₇ ~ U ₁₉	17	-992.6	-128.4	156.3	12.9	-1,121.0	- 836.3	-1,509.9	"
	19		-128.4	156.3		-1,121.0	- 836.3		

表 — 5

下弦材	格点	一次応力 σ_P (kg/cm ²)	二次応力 σ_S (kg/cm ²)		$\frac{\sigma_S}{\sigma_P} \times 100$	合成応力 σ (kg/cm ²)		許容応力 σ_{al} (kg/cm ²)	
			(上)	(下)		(上)	(下)	圧 縮	引 張
L ₀ ~ L ₂	0	848.6	-482.7	428.4	50.6	365.9	1,277.0	-1,502.0	1,950.0
	2		176.1	-156.2		1,024.7	692.4		
L ₂ ~ L ₄	2	1,157.0	293.4	-231.8	37.6	1,451.0	925.2	-1,482.0	"
	4		-550.3	434.8		606.7	1,591.8		
L ₄ ~ L ₆	4	1,216.5	75.2	- 64.6	18.4	1,291.7	1,151.9	-1,519.0	"
	6		224.6	-192.9		1,441.1	1,023.6		
L ₆ ~ L ₈	6	1,113.2	249.8	-197.7	22.4	1,363.0	915.5	-1,515.5	"
	8		- 84.6	67.0		1,028.6	1,180.2		
L ₈ ~ L ₁₀	8	1,042.3	204.0	179.7	68.5	1,246.3	1,222.0	-1,523.0	"
	10		-811.1	714.4		231.2	1,756.7		
L ₁₀ ~ L ₁₂	10	-993.7	258.1	-229.1	23.1	- 735.6	-1,222.8	-1,523.7	"
	12		824.1	770.7		- 169.6	- 223.0		
L ₁₂ ~ L ₁₄	12	-914.3	-612.5	531.9	67.0	-1,526.8	- 382.4	-1,558.2	"
	14		42.0	36.8		- 872.3	- 877.5		
L ₁₄ ~ L ₁₆	14	560.2	-153.1	133.0	99.3	407.1	693.2	-1,523.7	"
	16		556.0	-489.7		1,116.2	70.5		
L ₁₆ ~ L ₁₈	16	1,010.2	- 34.2	21.4	42.7	976.0	1,031.6	-1,518.15	"
	18		- 52.5	43.2		957.7	1,053.4		

表 — 6

撓 材	格点	一次応力 σ_P (kg/cm ²)	二次応力 σ_S (kg/cm ²)		$\frac{\sigma_S}{\sigma_P} \times 100$	合成応力 σ (kg/cm ²)		許容応力 (kg/cm ²)	
			(上)	(下)		(上)	(下)	圧 縮	引 張
L ₀ ~ U ₁	0	-879.0	- 21.0	21.0	47.1	- 900.0	- 858.0	-1,531.8	1,950.0
	1		-413.0	413.0		-1,292.0	- 466.0		
U ₁ ~ L ₂	1	1,275.1	25.6	- 25.6	15.1	1,300.7	1,249.5	-1,392.0	"
	2		192.8	-192.8		1,467.9	1,082.3		
U ₂ ~ U ₃	2	-802.9	-494.1	494.1	61.5	-1,297.0	- 308.8	-1,449.0	"
	3		358.5	-358.5		- 444.40	-1,161.4		
U ₃ ~ L ₄	3	1,214.7	- 5.6	5.6	17.3	1,209.1	1,220.3	- 795.0	"
	4		-209.6	209.6		1,005.1	1,424.3		
L ₄ ~ U ₅	4	-587.8	266.1	-266.1	45.2	- 321.7	- 853.9	-1,087.5	"
	5		20.6	- 20.6		- 567.2	- 608.4		

針 材	格点	一次応力 σ_P (kg/cm ²)	二次応力 σ_S (kg/cm ²)		$\frac{\sigma_S}{\sigma_P} \times 100$	合成応力 σ (kg/cm ²)		許容応力 (kg/cm ²)	
			上	下		上	下	圧 縮	引 張
U ₅ ~ L ₆	5	-587.5	- 41.5	+ 41.5	59.5	- 629.0	- 546.0	- 978.0	1,950.0
	6		348.6	-348.6		- 238.9	- 936.1		
L ₆ ~ U ₇	6	1,191.6	- 28.9	28.9	71.7	1,162.7	1,220.5	-1,038.0	"
	7		-853.6	853.6		338.0	2,045.2		
U ₇ ~ L ₈	7	-808.7	374.3	-374.3	37.4	- 434.4	-1,183.0	-1,450.0	"
	8		-206.0	206.0		-1,014.7	- 602.7		
L ₈ ~ U ₉	8	1,236.1	- 21.0	21.0	17.0	1,215.1	1,257.1	-1,064.0	"
	9		8.2	- 8.2		1,244.3	1,227.9		
U ₉ ~ L ₁₀	9	-881.9	204.0	-204.0	43.2	- 677.9	-1,085.9	-1,454.4	"
	10		-381.2	381.2		-1,263.1	500.7		
L ₁₀ ~ U ₁₁	10	1,266.4	-347.6	347.6	60.5	918.8	1,614.0	-1,570.5	"
	11		766.6	-766.6		2,033.0	499.8		
U ₁₁ ~ L ₁₂	11	-921.2	-200.9	200.9	56.8	-1,122.1	- 720.3	-1,530.0	"
	12		523.5	-523.5		- 397.7	-1,444.7		
L ₁₂ ~ U ₁₃	12	-976.2	888.2	-888.2	91.0	- 88.0	-1,864.4	-1,519.5	"
	13		-430.0	430.0		-1,406.2	- 546.2		
U ₁₃ ~ L ₁₄	13	1,236.2	1.5	- 1.5	41.2	1,237.7	1,234.7	-1,094.0	"
	14		508.5	-508.5		1,744.7	727.7		
L ₁₄ ~ U ₁₅	14	-915.8	334.2	-334.2	36.5	- 581.6	-1,250.0	-1,450.2	"
	15		-120.7	120.7		-1,036.5	- 795.1		
U ₁₅ ~ L ₁₆	15	1,274.8	-572.1	572.1	44.8	702.7	1,846.9	-1,713.0	"
	16		54.3	- 54.3		1,329.1	1,220.5		
L ₁₆ ~ U ₁₇	16	-723.0	-210.8	-210.8	137.0	- 933.8	- 512.2	-1,099.0	"
	17		991.9	-991.9		268.9	-1,714.9		
U ₁₇ ~ L ₁₈	17	937.8	- 92.8	92.8	27.6	845.0	1,030.0	- 779.4	"
	18		258.3	-258.3		1,196.1	679.5		

表 — 7

表—8 各節点のタワミ (mm)

上・下弦材	$(\bar{M}M/I) \cdot s$	斜 材	$(\bar{M}M/I) \cdot s$
U ₀ ~ U ₃	3.1720	L ₀ ~ U ₁	100.5817
U ₃ ~ U ₅	7.1889	U ₁ ~ L ₂	0.2826
U ₅ ~ U ₇	19.6100	L ₂ ~ U ₃	3.5407
U ₇ ~ U ₉	25.7900	U ₃ ~ L ₄	17.6840
U ₉ ~ U ₁₁	173.1960	L ₄ ~ U ₅	1.2687
U ₁₁ ~ U ₁₃	481.6440	U ₅ ~ L ₆	16.7879
U ₁₃ ~ U ₁₅	0.7521	L ₆ ~ U ₇	323.7000
U ₁₅ ~ U ₁₇	269.5460	U ₇ ~ L ₈	13.8250
U ₁₇ ~ U ₁₉	56.9934	L ₈ ~ U ₉	8.2662
L ₀ ~ L ₂	19.0000	U ₉ ~ L ₁₀	196.2400
L ₂ ~ L ₄	353.0290	L ₁₀ ~ U ₁₁	193.5700
L ₄ ~ L ₆	13.9011	U ₁₁ ~ L ₁₂	9.4992
L ₆ ~ L ₈	62.5080	L ₁₂ ~ U ₁₃	123.416
L ₈ ~ L ₁₀	450.4980	U ₁₃ ~ L ₁₄	169.4700
L ₁₀ ~ L ₁₂	511.5900	L ₁₄ ~ U ₁₅	25.1715
L ₁₂ ~ L ₁₄	162.8900	U ₁₅ ~ L ₁₆	341.8600
L ₁₄ ~ L ₁₆	71.6714	L ₁₆ ~ U ₁₇	532.9000
L ₁₆ ~ L ₁₈	1.0367	U ₁₇ ~ L ₁₈	11.8125

節点	節点を鉸と仮 定せる場合 (仮想働の原理)	節点剛性を考慮せる場合		
		軸力のみ	二次モー メント	合 計
1	1.80	1.50	0.08	1.58
2	32.40	26.96	1.44	28.40
3	46.80	39.06	2.09	41.15
4	46.80	39.06	2.09	41.15
5	48.50	40.45	2.17	42.62
6	68.40	57.02	3.20	60.22
7	65.70	53.93	2.89	56.82
8	54.10	45.05	2.41	47.46
9	32.40	26.96	1.33	28.29
10	18.00	15.00	0.80	15.80
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
4	0	0	0	0
15	7.22	6.02	0.32	6.34
16	9.00	7.50	0.40	7.90
17	32.40	26.96	1.43	28.39
18	36.00	30.11	1.57	31.68

$$\Sigma M \bar{M} \frac{s}{I} = 5829.5175 \quad \therefore \Sigma M \bar{M} \frac{s}{I} \nu = 4663.6140$$

$$\therefore \delta = \frac{4663.6140}{2100} = 2.2221 \text{ cm} = 22.221 \text{ mm}$$

参 考 文 献

- 1) 関西橋梁鉄骨溶接研究会：溶接道路橋の設計と施工，1～5，154～161 (昭 33) 共立出版.
- 2) 青木楠男：溶接鋼橋，118～158 (昭 10) シビル社.
- 3) James G. Clark: Welded Deck Highway Bridge 62～113 (1950), The James F. Lincoln Arc Welding Foundation.
- 4) 日本国有鉄道構造物設計事務所：新幹線相模川橋梁設計計算書および同設計図，1～88 (昭 36).
- 5) 小田弥之亮：複斜材の応力，第一巻，8～23 (昭 16) 丸善.
- 6) 三瀬幸三郎：九州帝国大学工学彙報 10～4，189～195，(昭 10-10).
- 7) 鷹部屋福平：一般剛節構の実用解法，103～121 (昭 12) 岩波書店.
- 8) 中村作太郎・番匠 勲：土木学会北海道支部技術資料 No. 18, 14 (昭 37).
- 9) 八幡製鉄株式会社：高張力鋼 デザインマニュアル (橋梁編)，123～165 (昭 39) 理工図書.
- 10) 中村作太郎・番匠 勲・志村政雄：室蘭工業大学研究報告，4～1，127～144 (昭 37-6).
- 11) 中村作太郎・番匠 勲・須田 勲・志村政雄：室蘭工業大学研究報告，4～2，1～22 (昭 38-6).
- 12) 中村作太郎：室蘭工業大学研究報告，4～1，111～125 (昭 37-6).