

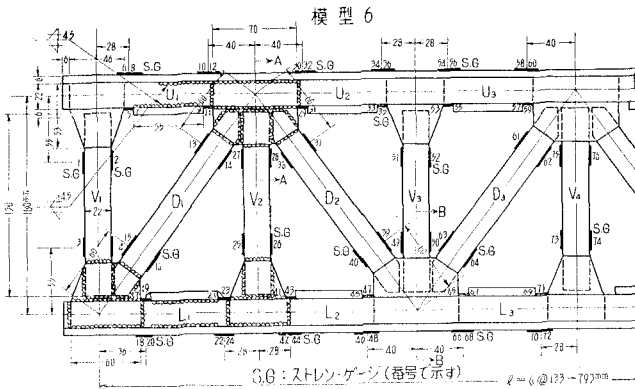
箱形弦材を有する模型トラスの座屈現象について

正員 室蘭工業大学 中村 作 太 郎
 正員 同 番 匠 勲
 ○正員 同 須 田 勲
 正員 同 志 村 政 雄

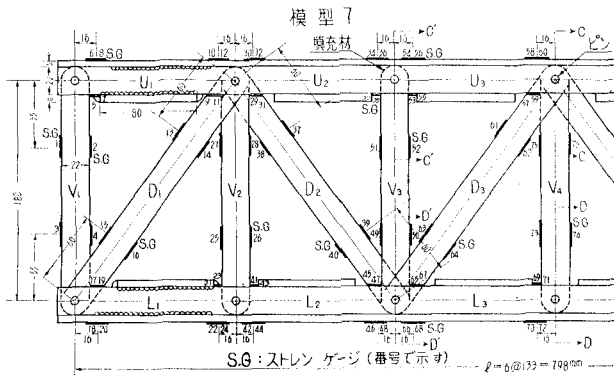
I. 緒 言

図-1 のような上路式のワーレン・トラス橋の模型2種類
 (溶接結合1種類, ピン結合1種類, 支間 $l=79.8\text{ cm}$, トラス

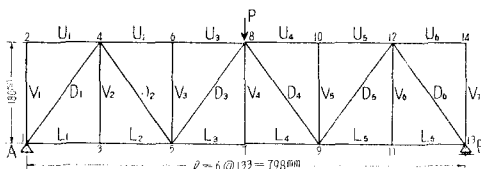
の高さ $h=18.0\text{ cm}$) について, 上弦材の中央点に最大力量
 150 t のアムスラー式圧縮試験機を用いて载荷し, 荷重の増
 加に伴う下弦材中央点のタワミならびに各部材の応力の変
 化状態を測定し, トラスが座屈または弾性破壊するまでの



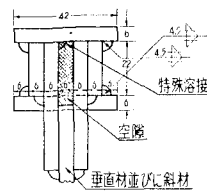
(a) 溶接結合トラス橋の模型詳細図



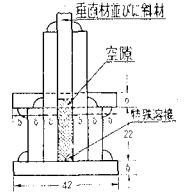
(d) ピン結合トラス橋の模型詳細図



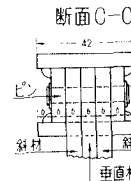
(g) トラス橋の模型6および7の一般寸法図



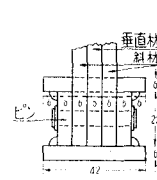
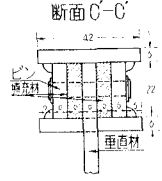
(b) 上弦材断面A-A
(溶接トラス)



(c) 下弦材断面B-B
(溶接トラス)



(e) 上弦材格点断面取付の図
(ピン結合トラス)



(h) 下弦材格点断面取付の図
(ピン結合トラス)

図-1 上路式ワーレン・トラス橋の模型図

経過とその極限状態付近の応力度と変形についての現象を明白ならしめ、変形を考慮せるトラスの計算理論¹⁾を追究するとともに、力学的経済性において優れたトラス橋を設計できるための基礎資料に供せんとする。

II. 模型トラスの座屈実験

1. 模型製作

図-1のとおり、上路式の平行弦ワーレン・トラスの模型2種類、すなわち、溶接結合(上下弦材とも箱形断面で、 $PL\ 0.6\text{ cm} \times 4.2\text{ cm}$ 2枚, $PL\ 0.6\text{ cm} \times 2.2\text{ cm}$ 2枚使用, 垂直材, 斜材とも, $PL\ 0.6\text{ cm} \times 2.2\text{ cm}$ 1枚使用, (a), (b), (c) 図参照)とピン結合(上下弦材とも箱形断面で $PL\ 0.6\text{ cm} \times 4.2\text{ cm}$ 2枚, $PL\ 0.6\text{ cm} \times 2.2\text{ cm}$ 2枚使用, 垂直材, 斜材とも $0.6\text{ cm} \times 2.2\text{ cm}$ 1枚使用し, ボルトの径 8 mm を用いた。 (d), (e), (f) 図参照)の模型を構造用平鋼を用い, 函館ドック室蘭製作所に依頼作製した。

2. 実験装置

(1) Strain Gage
K-19-1, Gage Length 3 mm , Gage Resist. $120.0 \pm 0.3\ \Omega$, Gage Factor $2.09 \pm 1.5\%$ 以上の条件を持った Strain Gage を二つの各模型について上下弦材では一部材につき8枚ずつ, 垂直材, 斜材では一部材につき4枚ずつ計76枚を使用した。

(2) Strain Meter
SM-4J 抵抗線歪測定器を使用する。

(3) スイッチボックス
24点スイッチボックス3個と6点スイッチボックス1個を使用し, 76点測定した。

(4) ダイアルゲージ
下弦材中央点のタワミの測定のために使用する。
精度…… $1/100\text{ mm}$

(5) アムスラー式圧縮試験機
 150 t のアムスラー式圧縮試験機を使用し, 座屈または弾性破壊するまで測定した。

3. 実験方法

(1) 実験準備
(a). 2個の模型各々に76枚ずつストレンゲージを図-1のとおりはる。

(b). ゲージにターミナルおよびリード線を接続する。このリード線を24点スイッチボックス3個と6点スイッチボックスに接続し, ダミーゲージには実験を行わない模型のゲージを使用する。

(c). ストレンメーター, スイッチボックスの初平衡調整を行なう。

(d). 全部の調整が終わったら測定準備完了である。

(2) 測定要領と方法

(a). 集中荷重は 150 t アムスラー式圧縮試験機によって

上弦材の中央点にかける。
(b). 初荷重を 500 kg とし, 以下 500 kg ずつ荷重を順次増して行き, 500 kg ごとに測定値を記録する。すなわち, 部材応力および中央点のタワミをストレンメーターとダイアルゲージによって測り, 荷重は弾性破壊または座屈するまで続け, 部材応力とタワミの変化状態を明らかにしめた。

(c). ダイアルゲージは下弦材中央点の底部にとりつけ, 弾性限度以上の荷重に対してもできるだけ入念に測定を試みた。また, 弾性破壊または座屈を起こす極限状態付近の現象を仔細に観測した。

4. 実験結果

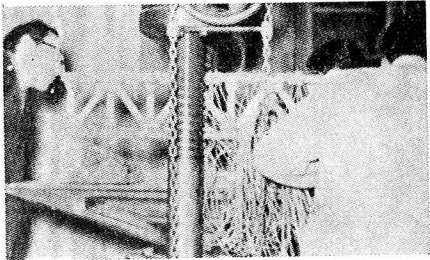


写真-1 模型実験中の状況

写真-1は実験中の状況を示したものである。

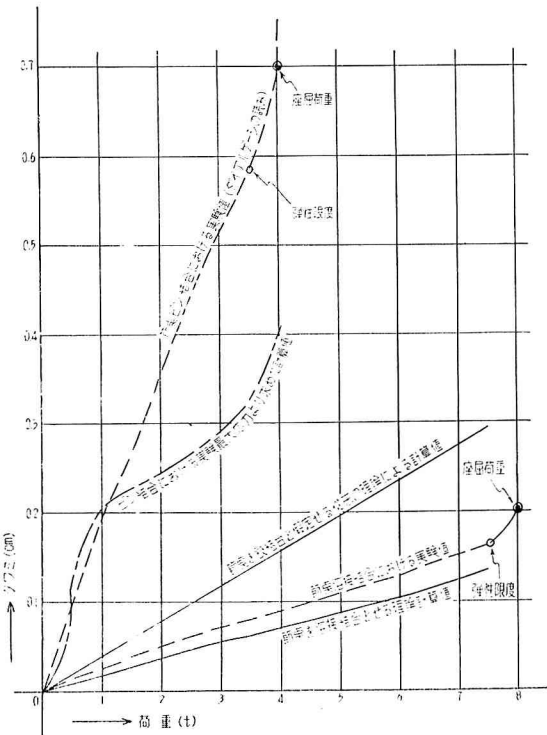


図-2 トラスの荷重-タワミ (下弦材中央点) 曲線図

(a) 平面図

(c) 正面図

(a) 平面図

(c) 正面図

(b) 側面図

(b) 側面図

写真-2 ピン結合トラスの座屈時における変形写真

写真-3 溶接結合トラスの座屈時における変形写真

図-2は模型トラスの荷重—タワミ曲線を示したもので、理論計算による結果との比較をも示した。このグラフを見れば従来の理論による計算結果は実験値と著しく違っていることがわかる。節点溶接結合の模型トラスでは、節点剛度を考慮に入れた計算方法²⁾によれば実験値とかなりよく一致することがわかった。

写真-2、写真-3はそれぞれ、ピン結合トラス、溶接結合トラスの模型が座屈したときの変形状況を示した写真であ

り、図-3、図-4は、これらの座屈したそれぞれの模型の変位投影図を画いたものである。この結果を見ればわかっており、溶接結合トラスに比べピン結合トラスの変形と変位には著しいものがあり、注目に価する。なお、弾性限度以内における部材応力の実験値^{3),4)}も求め、理論計算値と比較のため図示したのであるが、本文の主旨でないので省略する。

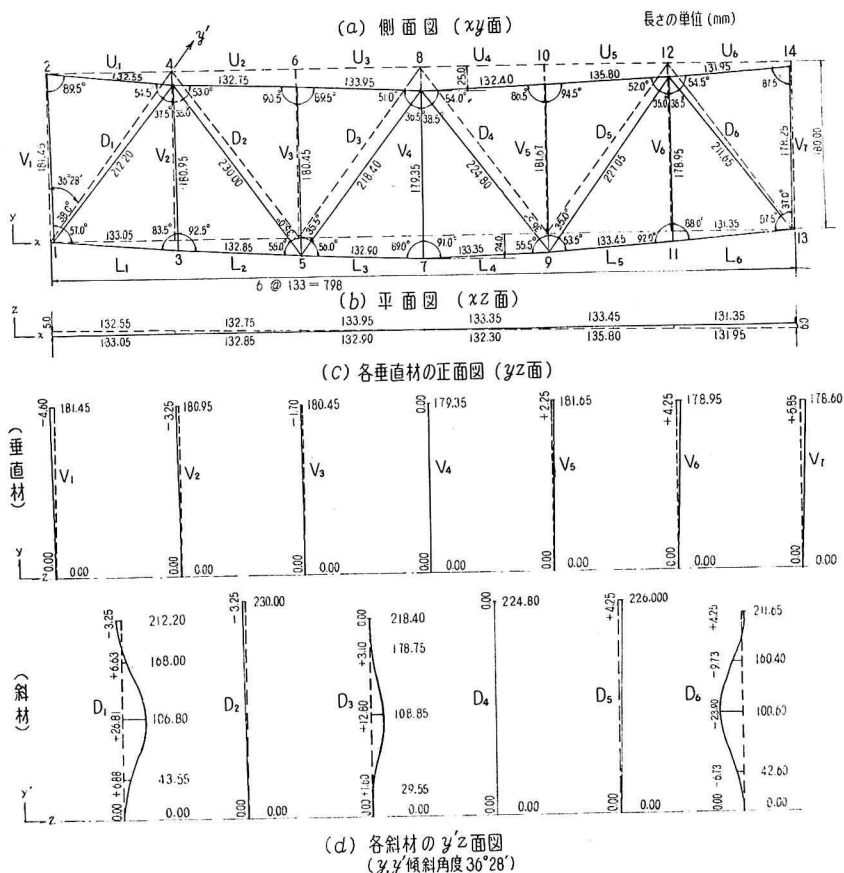


図-3 ピン結合のワーレン・トラス模型の変位投影図

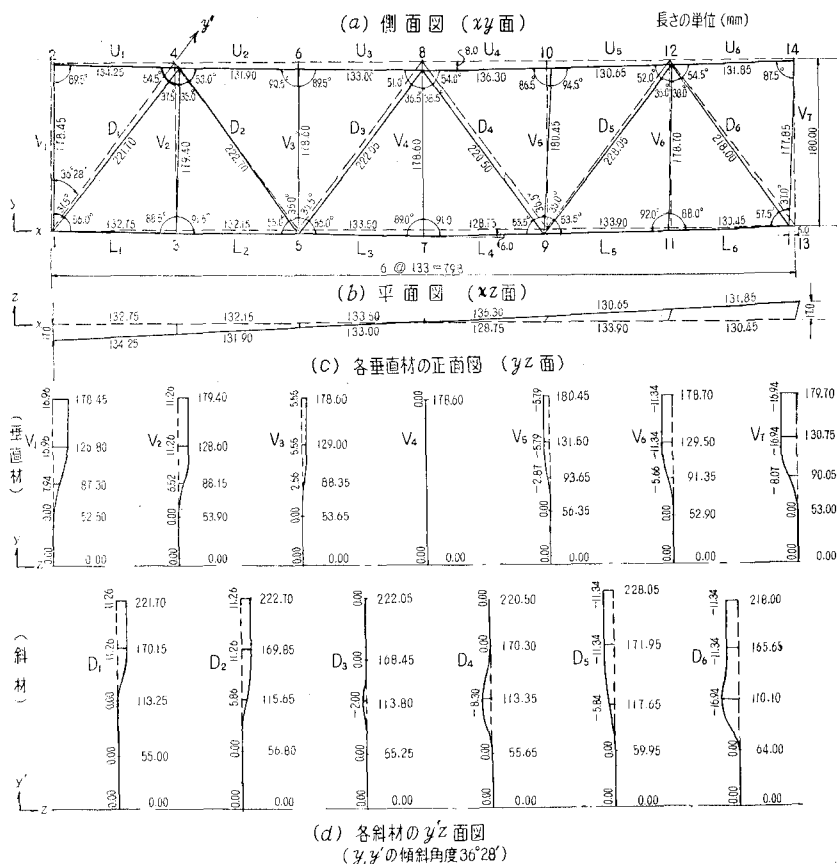


図-4 溶接結合のワレン・トラス模型の変位投影図

III. 模型トラス部材の素材試験

模型トラスの座屈実験に伴う部材の座屈または弾性破壊応力度を吟味するため、部材の素材試験を行なった。素材試験には、最大力量 50t の RH・リール型万能試験機と最大力量 20t のアムスラー式圧縮試験機を使用した。

1. 引張試験 (Tension Test)

引張試験の結果は表-1のとおりである。また引張試験における応力—歪曲線を画けば、図-5が得られる。

表-1 引張試験結果

試験片	断面積 (cm ²)	降伏点荷重 (kg)	降伏点応力 (kg/cm ²)	破壊荷重 (kg)	破壊応力 (kg/cm ²)	伸び (cm)
No. 1	1,644	4,750	2,889	7,190	4,373	3.00
No. 2	1,624	4,700	2,894	7,200	4,433	3.15
No. 3	1,592	4,730	2,971	7,250	4,554	3.05
No. 4	1,589			7,160	4,506	3.10
No. 5	1,589			7,220	4,544	3.10
平均			2,918		4,482	

(注) 試験片寸法: 平均値 6.20 mm×26.10 mm×160 mm

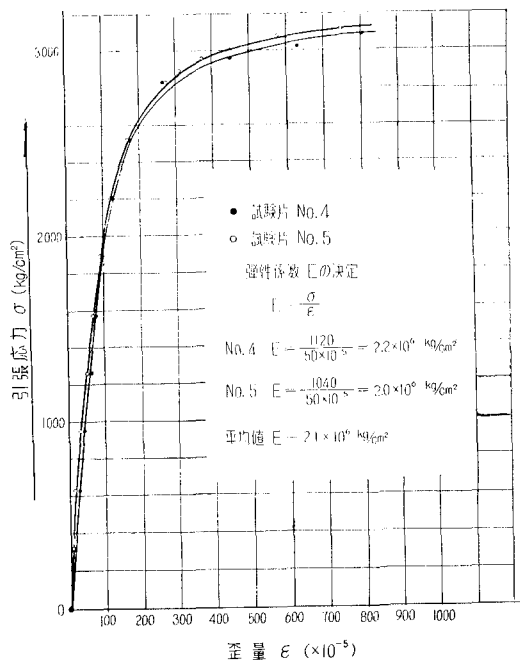


図-5 素材の引張試験における応力—歪曲線図

図-5において、弾性係数 E を決定すれば、平均値 $E=2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ となる。

2. 圧縮試験 (Compresion Test)

圧縮試験結果を示せば表-2のとおりである。

表-2 圧縮試験結果

試験片	降伏点応力 (kg/cm ²)
No. 1	-3,851
No. 2	-3,668
No. 3	-3,803
No. 4	-3,724
No. 5	-3,596
平均	-3,728

(注) 試験片寸法：平均径 20 mm × 長さ 44.9 mm

3. 曲げ試験 (Bending Test)

参考のため、試験片の平均寸法 6.2 mm × 25.3 mm × 180 mm のものにつき曲げ試験を行なった結果、降伏点荷重 205 kg、破壊時荷重 230 kg を得、これより曲げ応力度を計算すれば、 $\sigma_{B(Y.P)}=5,691 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\sigma_{B(Break)}=6,385 \text{ kg/cm}^2$ を得た。

IV. 模型トラス部材の座屈応力度に関する考察

ピン結合トラスでは、最大荷重 $P_k=4 \text{ t}$ 、溶接結合トラスでは、最大荷重 $P_k=8 \text{ t}$ で、いずれも最初斜材 D_1 が Z 軸方向に著しい変形を起こして座屈した。

座屈を起こした部材は主として矩形の単断面を使用した斜材、垂直材であり、箱形断面を有する上弦材、下弦材は横方向の安定性もよく座屈しなかった。

計算によれば、垂直材 V_4 が最も弱いはずだったが斜材 D_1 のほうが先に座屈した現象は興味深いものを感じる。

表-3 部材応力計算表

部材名	単位荷重による 部材軸力 S_0 (kg)	断面積 A (cm ²)	単位荷重による 部材の断面応力 σ_0 (kg/cm ²)	ピン結合のとき $P_k=4 \text{ t}$ のとき の部材応力度 σ_k (kg/cm ²)	溶接結合のとき $P_k=8 \text{ t}$ のとき の部材応力度 σ_k (kg/cm ²)
U_1	0	5.16	0	0	0
U_2	-0.7389	"	-0.1432	- 572.8	-1,145.6
U_3	-0.7389	"	-0.1432	- 572.8	-1,145.6
L_1	+0.3694	"	+0.0716	+ 286.4	+ 572.8
L_2	+0.3694	"	+0.0716	+ 286.4	+ 572.8
L_3	+1.1083	"	+0.2148	+ 859.2	+1,718.4
V_1	0	1.32	0	0	0
V_2	0	"	0	0	0
V_3	0	"	0	0	0
V_4	-1.000	"	-0.7576	-3,030	-6,061
D_1	-0.6217	"	-0.4710	-1,884	-3,768
D_2	+0.6217	"	+0.4710	+1,884	+3,768
D_3	-0.6217	"	-0.4710	-1,884	-3,768

(注) P_k : 座屈荷重を示す。

表-4 σ_k, σ_k', P_k の計算値

部材名	σ_k および P_k の 計 算 値						σ_k' (kg/cm ²)		摘 要
	σ_k (kg/cm ²)			P_k (kg)			$P_k=4$ t の 場合 (ピ ン結合)	$P_k=8$ t の 場合 (溶 接結合)	
	$n=1$	$n=2$	$n=4$	$n=1$	$n=2$	$n=4$			
V_4	-1,914	-3,828	-7,657	2,526	5,053	10,106	-3,030	-6,060	圧縮材
D_1, D_3	-1,242	-2,488	-4,976	2,636	5,282	10,564	-1,884	-3,768	圧縮材
D_2	+4,482			9,515			+1,884	+3,768	引張材

(注) σ_k : 計算による部材の座屈または弾性破壊応力度 (kg/cm²)

P_k : 部材に σ_k を生ずるときのトラス中央点の荷重 (kg)

σ_k : トラスの実験による座屈荷重 $P_k=4 \text{ t}$ および $P_k=8 \text{ t}$ のときの部材応力度 (kg/cm²)

n : オイラーの公式に含まれる節点の係数 $= (l/l_k)^2$

1. トラスの座屈荷重時における各部材応力

座屈荷重時の各部材応力を計算すれば表-3が得られる。

2. 部材の座屈に関する計算

すでに述べたとおり、部材の座屈または弾性破壊に関係があるのは、斜材 D_1 を初めとして、斜材 D_2 , D_3 , 垂直材 V_4 などであるので、特にこれらの部材を取り出して圧縮材については、オイラーの長柱公式²⁾を用いて座屈応力度を検し引張材については、素材試験結果を用いてその弾性破壊応力度を検した。

また、これらの座屈または、弾性破壊応力度を座屈荷重時におけるトラスの部材応力度と比較すれば表-4が得られる。

図-6は、中央点載荷の大きさと D_1 , D_3 , V_4 部材の座屈応力度との関係を示したものである。

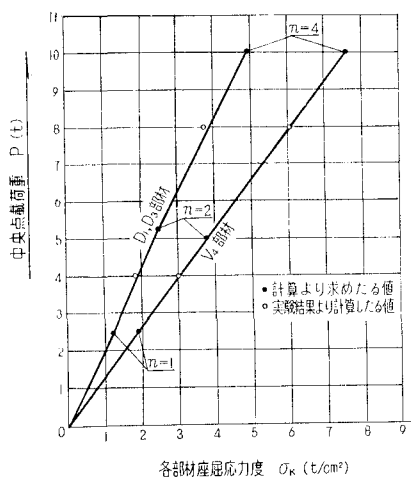


図-6 中央点載荷重と各部材座屈応力度との関係

3. 考 察

(1) タワミについて

図-2を見ればわかるとおり、ダイアログの読みによる実験タワミは、ピン結合、溶接結合のいかんを問わず、従来のトラスのタワミ理論による計算値とは著しくかけ離れている。しかし節点剛性の影響を考慮せる厳密計算法²⁾によって求めた計算値は、節点溶接結合トラスの実験値にはかなりよく接近している。また、ピン結合トラスにおける実験タワミは非常に大きく溶接結合トラスのタワミの5~7倍にも達している。これはピン結合トラスでは節点変位と部材の変形の影響によるところきわめて大なるためであると考え。この意味において弾性限度付近の大なる部材応力度の場合については、変形を考慮に入れた厳密計算方法による必要がある。参考のため、ピン結合トラスにおけるタワミを実験最大部材応力を用いて計算して見たところ荷重1t位まではかなり接近した値が得られた。しかしやはり荷重が増大するにつれ、実験値とはかなり相離れて行

くことがわかった。

この実験結果より溶接結合トラスはピン結合トラスに比べ、はるかに数段と優れていることがわかった。これは鉄結トラスと溶接トラスの模型について Karl Bung⁶⁾氏が行なった実験結果より見てもうなづけるところである(図-7参照)。

(2) 座屈または弾性破壊現象について

溶接結合トラスはピン結合トラスに比べその座屈荷重もはるかに大きく実験の結果が示すとおりピン結合トラスが4tで座屈したのに対し、溶接結合トラスは8tで漸く座屈した。しかも、ピン結合トラスの弾性限度が不明瞭(一応3.5tと見なす)なるに反し、溶接結合トラスの弾性限度は明瞭で、7.5tと決定することができた(図-2参照)。

計算では V_4 が一番危険と思われたが、いずれの模型も一番初めに斜材 D_1 , 続いて D_3 が座屈した。

そこで、二つの模型の変位投影図、図-3、図-4より座屈長 l_k を求め、オイラーの長柱公式 $\sigma_k = \frac{n\pi^2 EI}{(l/r)^2}$ 中の $n = (l/l_k)^2$ に代入すれば、次の結果が得られる。

溶接結合トラス

D_1 部材では、 $l_k = 108.45 \text{ mm}$, $n = (l/l_k)^2 = 4.26$

D_3 部材では、 $l_k = 113.2 \text{ mm}$, $n = (l/l_k)^2 = 3.91$

D_1 , D_3 の平均 $n = 4.08$

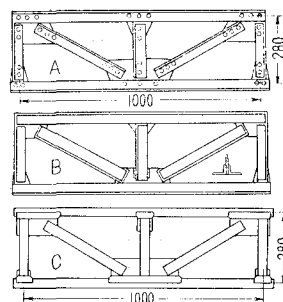
ピン結合トラス

D_1 部材では、 $l_k = 182.0$, $n = (l/l_k)^2 = 1.51$

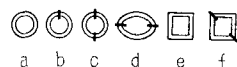
D_3 部材では、 $l_k = 218.4$, $n = (l/l_k)^2 = 1.05$

D_1 , D_3 の平均 $n = 1.28$

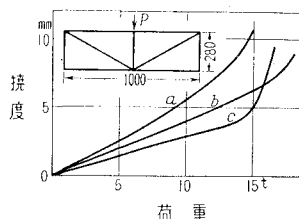
以上の計算結果より、ピン結合トラス斜材の座屈計算では、 $n \neq 1$ すなわち、オイラー式の両端ヒンジの場合に一致し、溶接結合トラスの場合は $n \neq 4$ で上式の両端固定の場合に大体一致する。そこで D_1 , D_3 の σ_k と σ_k' を比較して見れば、表-4でわかるとおり、ピン結合では、 $\sigma_k =$



(a) 鉄結トラス(1種)と溶接トラス(2種)の模型図



(b) 溶接環状部材トラス(C図)の部材断面図



(c) 鉄結トラスと溶接トラスの荷重-タワミ曲線の比較図

図-7 Karl Bung 氏の行なった模型トラスのタワミ実験に関する図

1,242 kg/cm² に対し、実験による $\sigma_k' = -1,884$ kg/cm² で D_1 , D_3 の横座屈した事実が明瞭となり、溶接結合では、 $\sigma_k = -4,976$ kg/cm² に対し、 $\sigma_k' = -3,768$ kg/cm² で実験値のほうが小さくなっているのは、素材の圧縮試験の結果得られた降伏点応力度 $\sigma_{y.p} = -3,728$ kg/cm² より判断してもうなづけるところである。

V. 結 言

本研究を総合すると、トラス橋の溶接結合はタワミを減少させ、トラス全体としての剛度と座屈荷重を増す上においてきわめて効果的であるといえる。

また、座屈は変位投影図の示すとおり Z 軸方向に起こり勝ちであるから、斜材、垂直材の断面も弦材同様に箱形または円形断面にすべきであると思う。Karl Bung 氏の実験結果もこれを立証するものであり、重心を通る任意の中立軸に関する慣性モーメントがすべてほぼ等しいような閉合断面の部材よりなる溶接結合トラスを推唱する次第である。ただ、温度脆性その他に関する溶接工学上の研究と格点における溶接方法の研究などが今後に残された課題であると思う。本研究は文部省科学研究交付金を受けた研究の

一部にして心から謝意を表するとともに、実験に協力頂いた室蘭工業大学土木工学科卒業生柳生雅規・松下慶一の両君に感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 中村作太郎：節点剛性と変形の影響を考慮せる一般トラス橋の厳密解法とその計算方法について (第1報). 室蘭工業大学研究報告, 第4巻, 第1号 (室蘭工業大学 1962).
- 2) 中村作太郎・番匠勲：節点剛性の影響を考慮せるトラス橋の厳密タワミ計算法について. 土木学会北海道支部技術資料, No. 18 (土木学会北海道支部, 1962).
- 3) 中村作太郎・番匠勲・志村政雄：ワーレン・トラス橋の模型実験について. 室蘭工業大学研究報告, 第4巻, 第1号 (室蘭工業大学, 1962).
- 4) 中村作太郎・番匠勲・志村政雄：ワーレン・トラス橋の模型実験について (第2報). 土木学会第17回年次学術講演会講演概要, I-33 (土木学会, 1962).
- 5) 長柱研究委員会：弾性安定要覧 2 版 (長柱研究委員会, 1960).
- 6) 青木楠男：鉚接鋼橋 (シビル社, 1960).