

格子状立体トラスの実物載荷試験およびその検討

山口 恒雄
武田 寿一

概 要

この種の大スパンの格子状立体トラス架構に懸垂型クレーン荷重のような線荷重が作用する場合、その変形性状は平板的であり、載荷位置近くのトラス部材の協働の影響が実験結果、計算結果からもうかがわれる。また、電子計算機の大型化に伴ない、この種の立体トラスについても容易に精算値に近い解が得られるようになったが、トラス梁の線材置換のように大胆な仮定に基づいた略算法であっても、定性的にも定量的にも説明できる十分な精度の解が得られる事が確かめられた。

1. 序

本実験は梁間50m、桁行88mの2-wayの格子状立体トラス版について、鉛直載荷試験を行なったものである。しかし、格子状立体トラスと言っても、この架構自体は特に目新しいものではなく、梁間方向に主トラス、桁行方向に緊ぎトラスが組合せられた通常のもので、接合部に関してはリベット打ち構造である。

トラス梁についてはその応力解析が非常に簡単であるためか、トラス架構の変形に関する実験データは余り多くないし、また、この種の大型屋根トラスに関して実際施工上で架構々面を所定のレベルにセットするのにどの程度のトラスキャンバーをつけるべきかの資料も不足している。

トラスの撓みについては、架構精度、溶接かりベットか、あるいはガセットプレートの大きさ等仕口の方法、施工順序と言った要素が多分に考えられる。さらに、この建物では天井走行の懸垂型クレーンが取り付けられるため、その駆動時のトラスの鉛直撓みを推定する必要があった。以上二つの理由から、実物について変形性状および強度安全性を検討、確認する目的で本実験を行なったものである。

なお、被載荷架構は電力中央研究所我孫子水理実験棟屋根トラスである。これは実験室では出来ない大型実物実験である事にも意義があると考えられる。

2. 屋根トラス構造概要

屋根トラスの形状および寸法は図-1～図-3に示されるように、L-型鋼を用いた純鉄骨造トラスであり、トラス周辺の支持条件は鉄筋コンクリート造柱および壁で支えられた片側ピン、他方ローラーの周辺単純支持である。またトラス合掌面、陸梁面には、それぞれサブトラス、水平ブレースなどが図-1に示される位置に設けられ、各緊ぎトラスの下端にはクレーンガーダーが鋼製ピースを介して取り付けられている。

なお、トラス架構体の主接合部はすべてR-12, R

1-9のガセットプレートを通じてリベットで接合されている。

また、主トラスは端部で2m、中央部で3mの丈であり、主トラス上弦材の勾配は $1/25$ である。現場施工時に設けられた屋根トラスのキャンバー高さは、短辺方向中央部で5cmであった。

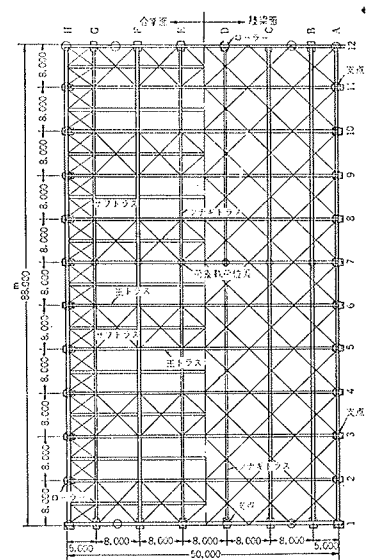


図-1 屋根伏図

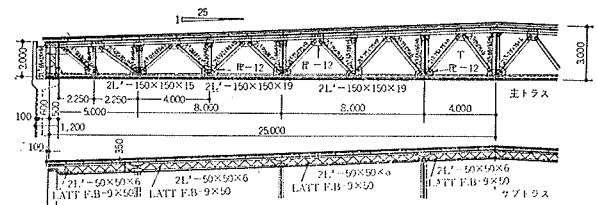


図-2 軸組図

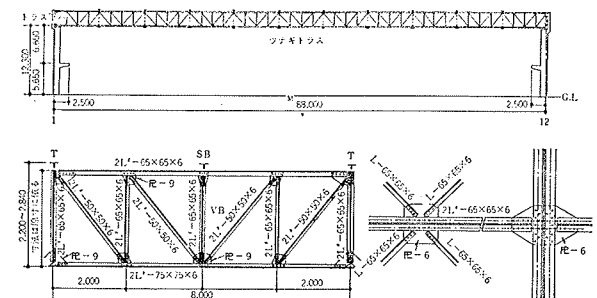


図-3 陸梁面水平ブレース詳細図

3. 実験方法

3.1. 載荷方法

クレーン駆動時荷重を想定し、屋根トラスに線荷重を加えた。すなわち、7通り主トラスと各緊ぎトラスとの交点、換言すれば、主トラスと緊ぎトラスとが交叉する位置の下端節点に、表-1. に示す荷重段階で載荷した。(図-1, 図-8 参照)

なお、この所で使用されるクレーンは6点懸垂型クレーン(最大吊上荷重1.5t)で、図

	ω (TON)	$Z\omega$ (TON)	
I	0.48	3.68	第1荷重
II	0.96	7.36	第2荷重
III	1.44	11.04	第3荷重

表-1 載荷々重段階

一9のように屋根トラスに取り付けられている。クレーン駆動時と全く同じ荷重を再現して実験を行なうことは総和荷重が大きくなり、載荷上困難なので、荷重分布はクレーン駆動時荷重が屋根トラスに対してもっとも危険側になる場合を想定して決めた設計荷重に基づいている。

なお、クレーン自重は14.4t、活荷重(カゴ荷重+吊上荷重)は4.0tである。クレーン衝撃係数を1.2とした。

荷重としては、1本当り重量約80kgのインゴットを使用し、所定荷重をチェーンブロック、ワイヤーロープなどでそれぞれ吊上げる方法を採用した。

3.2. 測定方法

部材軸方向歪度ならびに曲げ歪度をワイヤーストレインゲージで、節点の鉛直変位をダイヤルゲージを用いて測定した。ダイヤルゲージの使用に際しては、天井高が12m300と非常に高いために、所定のトラス下端節点からピアノ線を一定の引張力を加えた状態で張り、そのピアノ線の鉛直変位を測定する方法を採った。

なお、この様な方法を用いる場合、撓み測定値に対して温度補正が必要となる場合が多いが、今回の実験では載荷時間が短く、屋内実験であったので、温度変化による影響は小さかった。

4. 実験結果および考察

実験結果と比較、検討するために用いた理論値および略算値について下記に説明する。

理論1. 立体トラス架構全節点を絶対座標表示して、変形法を用いて電子計算機によりプログラミング解析したものである。

この場合、部材の断面重心線とゲージライン(架構線)との間には多少の偏心が認められるが、それによる架構全体の応力、変形に及ぼす影響は微少であると考えられるゆえ、この所では無視した。また、トラス節点に関しても、接合部での剛域部とも考えられるガセットプレートなどの占める領域が、おのおのそれに相当する位置の部材長さと比較して小さいので、単なる剛節として扱う。なお、各部材の剪断剛性について

は考慮しているが、その影響は小さいと考えられる。部材の振り剛性については無視した。周辺の支持条件は、片側ピン、他方ローラーの周辺単純支持である。

略算1. 主トラス、緊ぎトラスをそれぞれ断面一様な線材に置換して、周辺単純支持としての格子梁理論を応用する。

トラス梁の線材置換に際しては、トラス梁の上下弦材のみを考慮した曲げ材に置換し、トラスの剪断剛性、軸方向剛性などの影響は無視した。また、図-2, 図-3に示されるように、上、下弦材断面も一様ではなく、特に主トラスに関してはその上弦材が $1/25$ の勾配を持った変断面のトラス梁であるので、便宜上、主トラス、緊ぎトラス共その平均曲げ剛性をとり、格子梁としての性状係数を決定した。サブトラス、母屋、水平筋違、クレーンガーダーなどの影響については、それぞれ主トラス、緊ぎトラスの曲げ剛性と比較して微少であるので無視している。

なお、トラス梁の一樣線材置換理論に関しては、横浜国大の田口教授を始め種々な研究が為されているが変高トラス梁については未だ簡便な理論展開はない。トラス部材応力の不連続性の影響、もしくは、斜材、鉛直材などに関係する剪断剛性の影響を考慮して理論展開を行なった場合、それは非常に煩雑な式となり、この種の略算に應用するには困難なので、今後の研究にまちたい。

略算2. 略算1に依って得られた格子梁各交点におけるX, Y一方向の荷重分配から、7通り主トラス各交点での分担荷重を決定し、それを1-wayの主トラスに作用する外力として計算したものである。

略算1では、トラス梁の線材置換に際し、曲げ剛性のみを考慮し、剪断剛性等の影響については無視しているため、各交点での荷重分配はほぼ妥当であると考えられても、当然この種の置換梁はトラス梁に対して剛性低下が考えられる。略算2は略算1の変形剛性に剪断剛性などを考慮して修正したものである。

4.1. 撓み

図-4に架構全体の撓み曲線、図-5に7通り主トラスの主要節点の撓み曲線を示す。第1荷重段階での測定値については多少の乱れが見られるが、それは荷重原点をチェーンブロック及びワイヤーロープなど(それぞれ

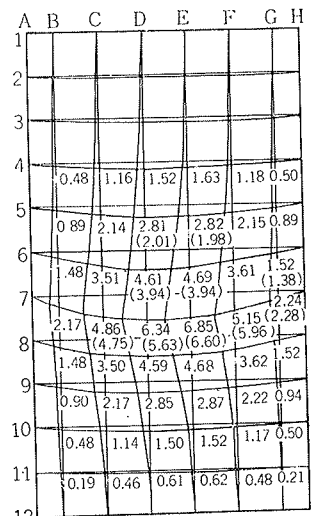


図-4 撓み曲線図($\omega=1.44$ t); 数値は理論1, ()内: 実験値単位mm

多少の重量差はあるが、総和で第1荷重の約10%の重量)を取り付けた状態にとつたため、10%内外の荷重誤差が考えられる事と、架構全体のなじみの問題が考えられる。しかしながら、第2、第3荷重段階では、載荷重量も多くなるゆえ、その影響も少いであろう。

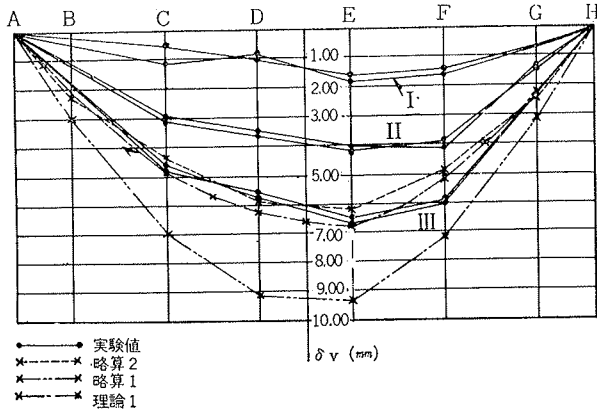


図-5 7通り主トラス主要節点の撓み曲線

図-5に見られるように、7通り主トラスの各節点の荷重と撓みの関係はほぼ直線的であり、各トラス梁の変形剛性、もしくはトラス部材応力は十分弾性域内にあると考えられる。前に述べたように、略算1の撓み計算値については、その計算過程で、一様な曲げ剛性を用いていること、トラス部材応力の不連続性の影響、もしくは剪断剛性の影響を無視しているために、必ずしも実験値に近似した結果が得られたとは言えないがそれに修正を加えた略算2およびほぼ精算値と考えられる理論1の値は比較的良い結果を示している。第3荷重段階 $\omega=1.44$ t時における架構の最大撓みを生ずる位置は、7通り主トラスとE通り繋ぎトラスとの交点であり、その点での実験値は $\delta v_{max}=6.60$ mmである。それに対し、理論1及び略算2の値は、それぞれ6.85mm、6.15mmとなり、実験値を1とした場合、理論1および略算2の値は1.04、0.91となり良く近似している。なお、略算2の主トラス各節点の鉛直変位に対し、それに相当する略算1の鉛直変位は、大略140~150%である。従って、この場合、トラス梁の一樣断面梁への置換ともなう略算1の変形剛性低下率が約50%となると考えられる。

また、図-4、図-5に立体トラス架構各部の主要節点の鉛直変位について、理論1の計算値と実験値とを併記した。それからわかるように、被載荷トラスである7通り主トラスから架構としての4格間離れた位置、すなわち3通り主トラスおよび11通り主トラスの各交点の鉛直変位はほぼ0に等しいと考えられる。この立体トラス版の全体としての撓み曲線は、線荷重が作用する周辺単純支持の矩形板的な性状を持つてることがわかる。

なお、表-2に示すように、1-wayトラス架構として7通り主トラスのみが全載荷々重を分担する(荷

重分布は前記の分布と同じ)とした場合、その各節点の撓み計算値は、実験値、理論1および略算2の各撓みと比較して、それぞれ約4倍となる。これは繋ぎトラス、隣接主トラスの変形剛性と被載荷主トラスのそれとの協働の影響と考えられる。すなわち、架構全体としての変形剛性は、X、Y一方向に組合せられたトラス梁の協働の影響により、1-wayトラスの変形剛性と比較して約4倍の増大をすると考えられよう。

4.2. 架構各交点における荷重分配

図-7に架構各交点における荷重分配図を示す。それは、X、Y-2方向トラス各交点でのトラス梁剪断力をその点における支持剪断力(単位t)として記入してある。

理論1の精算値および略算1の計算値とも、その所でたてた仮定には多少の相違はあっても、トラス梁各交点における支持剪断力は非常に良く近似している。この架構の場合には、曲げ剛性だけしか考慮していない略算でも十分な精度の解が得られる事がわかる。また、図-7に示されるように、実験値についてもほぼ計算値と近似した結果が得られているが、1点だけ、すなわち7-Fの交点だけに相当な差が認められる。これは撓み曲線の面にも表われていて、架構精度の影響ではないかと考えられるが、架構全体として見た場合、その影響は微小であり、強度的にも、また変形性状の面でも充分無視できよう。

7通り主トラス位置での各交点の荷重分配を見た場合、(図-7参照)、全載荷々重11.04 tのうち、繋ぎトラスの支持剪断力として分担される荷重は実験値(7.30 t)理論1(7.46 t)、略算1(7.38 t)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2								
3								
4								
5								
6		1.5	5.0	7.2	7.0	5.0	1.3	
7	3.0	8.0	11.0	15.0	10.5	4.8		
8	6.3	13.0	15.8	21.5	14.8	7.0		
9	3.3	8.6	12.0	12.0	9.3	3.5		
10	1.3	5.0	6.8	7.3	6.0	2.5		
11								
12								

図-6 曲げモーメント図 ($\omega=1.44$ t); 数値は理論1, 単位TM

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		+0.00	+0.00	+0.00	+0.00	+0.00	+0.00	
3		+0.01	+0.03	+0.04	+0.03	+0.02	+0.01	
4		+0.03	+0.09	+0.15	+0.15	+0.07	+0.03	
5		+0.01	+0.19	+0.37	+0.31	+0.21	+0.03	
6		+0.17	+0.39	+0.43	+0.68	+0.45	+0.25	
7		+0.09	+0.35	+0.33	+0.68	+0.55	+0.35	
8		+0.17	+0.31	+0.44	+0.68	+2.46	+0.25	
9		+0.03	+0.20	+0.37	+0.35	+0.22	+0.06	
10		+0.04	+0.19	+0.17	+0.17	+0.08	+0.03	
11		+0.01	+0.04	+0.06	+0.05	+0.03	+0.01	
12								

図-7 荷重分配図 ($\omega=1.44$ t); X,Y一方向トラス各交点の支持剪断力(単位t) 上段;理論1,下段;略算2,()内;実験値

となり、三者とも良く近似している。したがって、全載荷々重のうち約 $\frac{1}{3}$ が被載荷主トラスに分担され、残りの約 $\frac{2}{3}$ が緊ぎトラスの支持剪断力として分担される事が認められよう。

なお、前記攪みの項で述べたように、1-way 主トラス載荷の場合の変形剛性が立体トラス版のそれに比べて約 $\frac{1}{4}$ となるのは、作用荷重分布の差によるものと考えられる。すなわち、立体トラス版については、被載荷主トラス分担荷重の総和では全載荷々重の $\frac{1}{3}$ となるが、荷重分布的にみたら、トラス中央部より端部での荷重分担の比率が高い事が認められ、十分説明できる。

4.3. トラス部材応力

図-6に曲げモーメント図、図-8に7通り主トラス各部材軸方向歪度を示す。

図-6に示されるように、立体トラス版の曲げモーメント分布は被載荷トラスである7通り主トラスの位置で最大値を採り、3通り、11通り主トラスの位置ではほぼ0となっている。この事は攪みの項で述べたことと定性的に良く一致している。

7通り主トラス各交点における載荷々重に対しては、主に主トラス、緊ぎトラスの斜材および鉛直材の部材軸方向力に抵抗し、一部をトラス部材の2次剪断力および水平ブレース、母屋、クレーンガーダーなどの2次剪断力で分担すると考えられるが、後者の占める比率は微少であると考えられる。理論1で算定された結果からもそれは明白である。

図-8に示されるように、7通り主トラス各部材の軸方向歪度は実験値、理論1、略算2の各計算値共互いに良く近似し、部材の最大軸方向歪度はトラス端部斜材に生ずるが、今回の実験が実物実験であるために載荷々重面で制約が有り、設計荷重を最大載荷々重としているゆえ、その最大歪度の値は $32.5\sim 40.0 \times 10^{-6}$ 程度で非常に小さい。また1-wayのトラスに載荷した場合の部材歪度と比較すれば、それに相当する実験値は約25%となり、緊ぎトラスの支持力に分担される載荷々重の比率は大きいことが認められる。

なお、部材軸方向応力の節点での釣合関係からも、前述したように、全載荷々重のうち約 $\frac{1}{3}$ が緊ぎトラスで分担され、残り $\frac{2}{3}$ 程度が被載荷トラスである7通り主トラスに分担されることがほぼ説明され得よう。

5. まとめ

以上主トラスおよび緊ぎトラスで構成される格子状立体トラス架構についての実験結果からほぼ次の事が言える。

5.1. 変形性状について

この様な格子状立体トラス版においても、応力の分散は大きく、その架構全体としての変形性状は平板的である。

なお、その変形剛性については、その大部分をX、Y-2方向のトラス梁の曲げ剛性、剪断剛性などが占め、2次部材である母屋、水平ブレース、クレーンガーダーなどの剛性が占める比率は当然のことながら微少である。

またクレーン駆動時のトラスの攪みは微少であり、強度安全性についても十分余裕があると推定される。

5.2. 架構について

実際施工上この屋根トラスのキャンバーは5cmにとられていたのであるが、架構組立完了後における現場での鉛直変位測定の結果、構面中央部で約9cmの変形が認められた。この架構の自重による攪み計算値(精算)は中央位置で $\delta v_{max} = 7.4cm$ となり、立体的に組まれたこの架構のなじみを考えに入れば、現場での測定値はほぼ妥当な値であると考えられる。したがって実験結果からもわかるように、この程度の変形増分は架構の耐力的な面に関して何等問題とならない。

結局、施工時の変位はほぼ計算で求められるが、やや計算値より大きくなるようである。

5.3. 架構の変位、応力解析について

変形法を用いた理論のように大容量電子計算機を用いて解析すれば、ほぼ精解値が得られるが、略算1、2のように大胆な仮定に基づいたトラス梁の線材置換法によるものであっても十分な精度の解が得られ、定性的にも定量的にも説明できよう。

なお、参考までに述べると、このような立体トラス架構を変形法を用いて解析する場合、その節点数、部材数などが非常に多くなり、その解析に要する計算費が相当高額になるゆえ、経済性からみた設計の合理化という面で、トラス梁の線材置換法のような略算法が

十分有用なものとなると考えられる。

最後に、本載荷試験に際し、御指導および御援助頂いた東京大学仲威雄教授並びに電力中央研究所および水理研究所建設事務所長神谷貞吉博士に深く感謝致します。

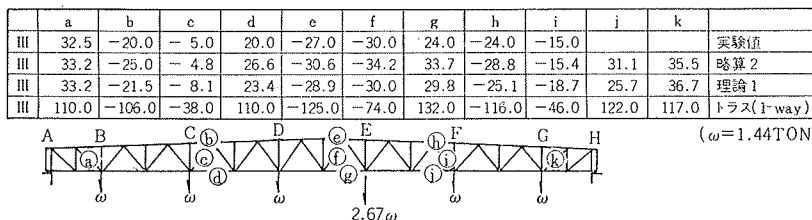


図-8 7通り主トラス各部材軸方向歪度 ($\times 10^{-6}$)

〔補〕クレーン駆動荷重時の推定撓みについて

表-2にクレーン荷重時（クレーン衝撃係数 1.2）の推定撓みの実験値，計算値などを示す。図-9に示されるように，この架構のクレーン駆動時荷重は，6通り，7通り，8通り各主トラスに2：3：1の荷重分担比で分割される。実験荷重は7通り主トラスの分担荷重のみを線荷重として決めたものであるから，架構が弾性域にある場合，相反作用定理を用いてクレーン荷重時の撓みは次式で表わされる。

$$\delta_{\text{クレーン}} = \frac{2}{3}\delta_6 + \delta_7 + \frac{1}{3}\delta_8$$

ここで， $\delta_{\text{クレーン}}$ は7通り主トラス節点のクレーン荷重時撓みである。また，7通り主トラス載荷の場合， $\delta_6 = \delta_8$ となるゆえ，近似的には $\delta_{\text{クレーン}} = \delta_6 + \delta_7$ となる。

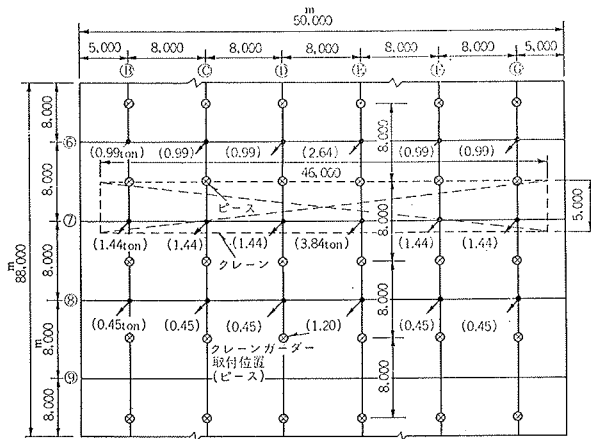


図-9-1 平面図

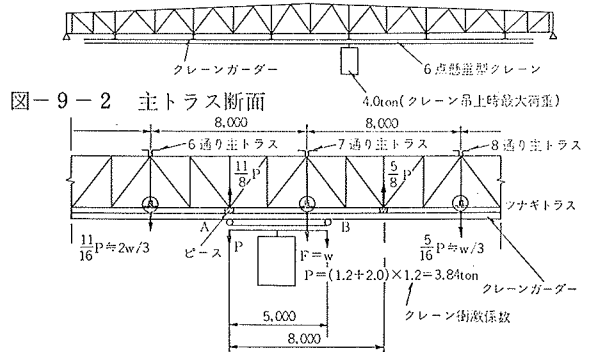


図-9-3 ツナギトラス断面（E通り）

図-9 クレーン取付け図

実際のクレーン駆動時荷重に対する架構の鉛直変位精算値と上記の推定撓みとを比較した場合（表-2参照）各節点での鉛直変位は84%~94%（実験値）と良く近似した結果となっている。また，各節点変位精算値に対し，1-wayトラスの変位は約2.3倍となり，相当安全側にある事が認められる。これは，1-wayトラス載荷の場合には繋ぎトラス，隣接主トラスなどの協働の影響を無視しているためと考えられる。

節 点	クレーン駆動時荷重による計算値		実 験 値				計 算 値	
	$\delta_{y,11}$ (MM)	$\delta_{y,11} / \delta_{y,11}$ (MM)	$\delta_{y,11} / \delta_{y,11}$ (MM)	$\delta_{y,11} / \delta_{y,11}$ (MM)	$\delta_{y,11} / \delta_{y,11}$ (MM)	$\delta_{y,11} / \delta_{y,11}$ (MM)	$\delta_{y,11} / \delta_{y,11}$ (MM)	$\delta_{y,11} / \delta_{y,11}$ (MM)
7-B	3.61				3.65	.958	9.31	2.48
7-C	8.73				8.37	.958	19.83	2.2
7-D	11.40		9.57	.840	10.99	.955	26.74	2.34
7-E	12.02		10.54	.879	11.54	.961	27.53	2.29
7-F	9.13				8.77	.961	21.63	2.37
7-G	3.91		3.66	.935	3.76	.952	9.58	2.45

表-2 クレーン駆動時荷重による7通り主トラス節点の鉛直変位

実験値，理論1及び1-Wayトラスの計算値に関しては7通り主トラス載荷の線荷重による鉛直変位からの推定値である。

したがって，クレーン荷重時の撓み，応力などを略算的に算定する場合，クレーン分担線荷重を所定トラスに載荷して，その撓み，応力から推定しても充分近似した結果が得られよう。1-wayトラス解析を用いる場合でも，その架構の安全率を含んだ値として得られる。

本実験担当者：武田寿一
山口恒雄
永井康淑