

下路トラス橋における床組の主構との協力作用について

ON THE CO-OPERATIVE ACTIONS OF FLOOR SYSTEM WITH MAIN STRUCTURE IN THROUGH TRUSS BRIDGES

児嶋 弘行*・成岡 昌夫**

By Hiroyuki Kojima and Masao Naruoka

要 旨 トラス橋における床組は、単に格子構造として主構の鉛直変位に抵抗する（鉛直荷重配分作用）だけでなく、橋軸方向の水平変位にも同時に抵抗する（水平荷重配分作用）。本文は、平行弦下路ワーレントラス橋について、これらの作用を、それぞれ、単独に考慮した場合の解と、同時に考慮した場合の厳密解とを比較し、両作用間の干渉の程度を検討して、厳密解析に対する一解法を提案するとともに、床組の鉛直および水平荷重配分効果、ならびに、縦桁に生ずる断面力などについて考察したものである。

1. は し が き

今日、桁並列橋にあっては、これに格子桁の理論を適用することによって、従来の平面的な設計計算法から脱皮して、立体的な解析に基づいて設計が行なわれることもめずらしいことではなくなった。桁橋にかぎらず、他の橋梁形式においても、床組を格子構造として解析することによって、このような立体的な設計計算も可能であるが、ただ、トラスとかアーチとかを主体とした橋梁形式においては、鉛直荷重によって主構に橋軸方向の水平変位が生じるため、単に床組の格子構造としての鉛直荷重配分作用を考慮するだけでは不十分で、水平変位に対する床組の抵抗によって生ずる水平荷重配分作用をも考慮する必要がある。実在のトラス橋の載荷実験を行なった場合、他の部材に比較して、特に載荷弦材の応力比がいちじるしく小さくなることは、この水平荷重配分作用の影響によるものが大きいと考えられる。

このような、トラス橋とか、アーチ橋とかを立体的に解析した例はごく少ないが、その二、三の例を示せば、鉛直荷重配分作用を対象としたものに、文献 1)、2) および 3) があり、水平荷重配分作用を対象としたものに、文献 4)、5) および 6) がある。文献 1)、2) は、格子桁とアーチとを組み合わせた補剛アーチ橋について、アーチの水平反力を起拱部で解放したものを基本系に選らんで水平反力を求め、これから吊材力を計算して、この吊材力と外力とを同時に受ける格子桁の解を求めて設計を行ない、あわせて模型実験を行なったものである。文献 3) は、トラス橋における縦桁を、横桁によって弾性支持された連続桁とみなして、これに、トラスのたわみ

による付加的な影響を考慮して解析し、縦桁の断面力に対する実用的な算出式を提案したものである。これによると、縦桁の曲げモーメントは、格間を単純桁とした場合を M_0 とすれば、端支間では $0.9 M_0$ 、中間支間では $0.8 M_0$ 、支点では $-0.5 M_0$ にとればよいことが示されている。

一方、文献 4) は、タイドアーチ橋におけるタイと、縦桁との協力作用について、中間横桁の影響を無視して論じたもので、縦桁に対してタイと同様の効果を期待する試みがなされており、文献 5) には、この考え方に基づいて設計施工された例が紹介されている。また、文献 6) は、鉄道橋の載荷実験結果について検討したもので、この中に、トラス橋の床組の水平荷重配分作用についての解析例が示されている。この研究では、縦桁は連続して軸力を負担することができ、縦桁と載荷弦材との軸力の和は、通常の計算法で得られる載荷弦材の軸力に等しいと仮定し、さらに、横桁は縦桁と載荷弦材とを連結する両端固定のパネばりと考えて解析している。これの単純支持プラットトラスについての計算結果をみると、縦桁は一般に 10~20%、特別な場合には 20~40% 弱の載荷弦材の軸力を負担することがわかる。

これらの研究は、床組の鉛直荷重配分作用と、水平荷重配分作用とを、それぞれ、単独に取り上げて解析したものであるが、本来は、これらの作用は同時に考慮すべきものである。しかしながら、その作用が相互に干渉する程度が少なければ、計算労力を軽減させるためにも、単独に考慮してさしつかえなからう。

筆者らは、鉛直荷重配分作用のみを考慮した場合を Case 1、水平荷重配分作用のみを考慮した場合を、Case 2、両作用を同時に考慮した場合を Case 3 として解析し、これらの各 Case を比較検討して、上述の点を明確にするとともに、通常の計算法による場合とも比較して、床組の荷重配分効果、縦桁の断面力などについて考察した。また、トラスの載荷弦材の軸力については、実在のトラス橋の載荷実験結果とも比較してみた。

2. 解法の概要

トラス橋を、床組も含めて全体的に一挙に解析することも、大型電子計算機を利用すれば、さほど困難なことではない。しかし、本研究では特に床組の効果を見るため、トラスと床組とを横桁端部において切断した基本系

* 正会員 工修 徳島大学助教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学教室

を考え、弾性方程式を立てて解く一般的な解法を用いた。このような解法は、不静定構造物の解析上ごく一般に用いられる方法で、本研究において特に改良した点もないので、その詳細は計算例にゆずる。

解析上の仮定は、

- i) トラスの上横構の影響は小さいとして無視する。
- ii) 床組は、縦桁と横桁とからなる耳桁を持たない格子桁とみなす。
- iii) 端横桁の鉛直方向の変位はないものとする。
- iv) 横桁は水平方向の曲げにも抵抗できる。
- v) 横桁とトラスの格点とはヒンジ結合されているものとする。

などである。

この仮定のもとに、基本系に作用させるべき不静定力は、各切断点において鉛直と水平との二方向の力である。これらの不静定力と、与えられた荷重とによる基本系の変形量を、各切断点について計算し、各切断点における変形の連続条件から弾性方程式を立てて、これを連立方程式として解けば、所要の不静定力が得られる。

3. 計算例

(1) 例題としたトラスの諸元

図-1 に示すような、単純支持下路ワーレン トラス橋について計算する。各部材の断面は従来の計算法によって二等橋として計算し、簡単のため同種類の部材間では一定として、その値をそれぞれの最大断面と一致させた。各部材の断面の性質を示せば 表-1 のようである。また、縦桁、および、横桁の断面形を図-2 に示す。

表-1 部材の諸性質

部材	上弦材	下弦材	端柱	斜材	縦桁	横桁
F (cm ²)	90	60	90	40	150	200
I (cm ⁴)	—	—	—	—	1.5×10 ⁵	3×10 ⁵

なお、横桁の水平方向の曲げに対する断面二次モーメントは $I' = 1.2 \times 10^4 \text{ cm}^4$ である。

(2) 基本系の変形量

さきに概説した解法を図-1 のトラス橋に適用した場

図-1 トラスの骨組と部材記号

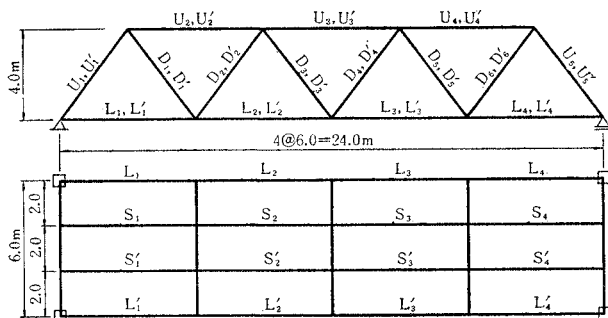


図-2 縦、横桁の諸元 (mm)

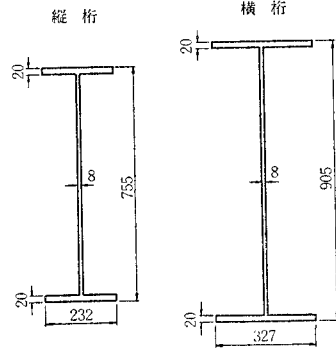


図-3 基本系と不静定力

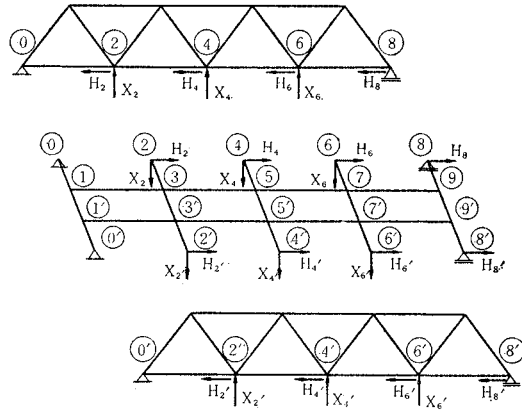


表-2 単位不静定力によるトラスの鉛直方向の変形量 (単位・×10⁻³・cm/t)

着目点	着目点	2, (2')	4, (4')	6, (6')
X=1	2, (2')	-24.337590	-23.234952	-13.203743
	4, (4')	-23.234952	-40.124829	-23.234952
	6, (6')	-13.203743	-23.234952	-24.337590
H=1	2, (2')	-2.678571	-1.785714	-0.892857
	4, (4')	-7.142857	-7.142857	-3.571429
	6, (6')	-9.821429	-12.500000	-8.035714
	8, (8')	-10.714285	-14.285714	-10.714285

合の、基本系と不静定力とを示せば 図-3 のようである。これらの不静定力を、それぞれ、X=1, H=1 とした場合について、基本系の鉛直方向と水平方向との変形量を、各不静定力の作用点に対して計算すると、表-2~5 のようになる。この程度の計算であれば、中型電子計算機によって容易に計算できる。

(3) 弾性方程式

(2) で得た基本系の各変形量を用いて、トラスの下弦格点と、床組の横桁端との変形が等しいという条件から、弾性方程式が以下のように得られる。

- i) 鉛直荷重配分作用のみを考慮する場合

(Case 1)

この場合には、不静定力 H は無視するから、

表-3 単位不静定力によるトラスの水平方向の変形量
(単位・ $\times 10^{-3}$ ・cm/t)

着目点		2, (2')	4, (4')	6, (6')	8, (8')
X=1	2, (2')	-2.678571	-7.142857	-9.821429	-10.714285
	4, (4')	-1.785714	-7.142857	-12.500000	-14.285714
	6, (6')	-0.892857	-3.571429	-8.035714	-10.714285
H=1	2, (2')	-4.761905	-4.761905	-4.761905	-4.761905
	4, (4')	-4.761905	-9.523810	-9.523810	-9.523810
	6, (6')	-4.761905	-9.523810	-14.285714	-14.285714
	8, (8')	-4.761905	-9.523810	-14.285714	-19.047619

表-4 単位不静定力による床組の鉛直方向の変形量
(単位・cm/t)

着目点		2, (2')	4, (4')	6, (6')
X=1	2, (2')	2.540157	3.088322	1.962426
	4, (4')	3.088322	4.502584	3.088322
	6, (6')	1.962426	3.088322	2.540157
H=1	2', (2)	-2.015290	-2.459750	-1.562426
	4', (4)	-2.459750	-3.577716	-2.459750
	6', (6)	-1.562426	-2.459750	-2.015290

表-5 単位不静定力による床組の水平方向の変形量
(単位・ $\times 10^{-2}$ ・cm/t)

着目点		2, (2')	4, (4')	6, (6')	8, (8')
H=1	2, (2')	4.226444	1.538114	1.512585	1.500678
	4, (4')	1.538114	4.317491	1.638249	1.622511
	6, (6')	1.512585	1.638249	4.427418	1.760082
	8, (8')	1.500678	1.622511	1.760082	4.564988
H=1	2', (2)	1.255036	1.297863	1.323392	1.335300
	4', (4)	1.297863	1.354465	1.388205	1.403942
	6', (6)	1.323392	1.388205	1.435015	1.456848
	8', (8)	1.335300	1.403942	1.456848	1.487920

変形の連続条件は、鉛直方向についてのみ成立すればよい。

いま、例題の格点2についてこの条件を適用すれば、表-2, 4 より

$$\begin{aligned}
 & 2.540157 X_2 + 3.088322 X_4 + 1.962426 X_6 \\
 & - 2.015290 X_{2'} - 2.459750 X_{4'} \\
 & - 1.562426 X_{6'} + \delta_{20}^{VF} \\
 & = -0.024338 X_2 - 0.023235 X_4 \\
 & - 0.013204 X_6 + \delta_{20}^{VT} \dots\dots\dots (1)
 \end{aligned}$$

となり、これを整理すれば、

$$\begin{aligned}
 & 2.564495 X_2 + 3.111557 X_4 + 1.975630 X_6 \\
 & - 2.015290 X_{2'} - 2.459750 X_{4'} - 1.562426 X_{6'} \\
 & = \delta_{20}^{VT} - \delta_{20}^{VF} \dots\dots\dots (1')
 \end{aligned}$$

となる。式中の δ_{20}^{VF} 、および、 δ_{20}^{VT} は、それぞれ、外荷重による床組、およびトラスの格点2の鉛直方向の変形量である。式(1')と同様の式を、残りの格点4, 6 および 2', 4', 6' について立てれば、表-6 に示す弾性方程式が得られる。

ii) 水平荷重配分作用のみを考慮する場合 (Case 2)

この場合には、X を無視し、H のみを考慮すればよいから、変形の連続条件は、水平方向のみ成立すればよい。これを格点2について示せば、表-3, 5 より

$$\begin{aligned}
 & 4.226444 H_2 + 1.538114 H_4 + 1.512585 H_6 \\
 & + 1.500678 H_8 + 1.255036 H_{2'} + 1.297863 H_{4'} \\
 & + 1.323392 H_{6'} + 1.335300 H_{8'} + 100 \delta_{20}^F \\
 & = -0.476191 H_2 - 0.476191 H_4 - 0.476191 H_6 \\
 & - 0.476191 H_8 + 100 \delta_{20}^{HT} \dots\dots\dots (2)
 \end{aligned}$$

となり、これを整理して

$$\begin{aligned}
 & 4.702635 H_2 + 2.014305 H_4 + 1.988776 H_6 \\
 & + 1.976869 H_8 + 1.255036 H_{2'} + 1.297863 H_{4'} \\
 & + 1.323392 H_{6'} + 1.335300 H_{8'} \\
 & = 100(\delta_{20}^{HT} - \delta_{20}^{HF}) \dots\dots\dots (2')
 \end{aligned}$$

となる。式中の δ_{20}^{HF} および δ_{20}^{HT} は、それぞれ、外荷重による床組、およびトラスの、格点2の水平方向の変形量である。残りの格点についても同様な式を立てれば、表-7 のような弾性方程式を得る。

表-6 Case 1 の場合の弾性方程式

X_2	X_4	X_6	$X_{2'}$	$X_{4'}$	$X_{6'}$	荷 重 項
2.564495	3.111557	1.975630	-2.015290	-2.459750	-1.562426	$\delta_{20}^{VT} - \delta_{20}^{VF}$
3.111557	4.542709	3.111557	-2.459750	-3.577716	-2.459750	$\delta_{40}^{VT} - \delta_{40}^{VF}$
1.975630	3.111557	2.564495	-1.562426	-2.459750	-2.015290	$\delta_{60}^{VT} - \delta_{60}^{VF}$
-2.015290	-2.459750	-1.562426	2.564495	3.111557	1.975630	$\delta_{2'0}^{VT} - \delta_{2'0}^{VF}$
-2.459750	-3.577716	-2.459750	3.111557	4.542709	3.111557	$\delta_{4'0}^{VT} - \delta_{4'0}^{VF}$
-1.562426	-2.459750	-2.015290	1.975630	3.111557	2.564495	$\delta_{6'0}^{VT} - \delta_{6'0}^{VF}$

表-7 Case 2 の場合の弾性方程式

H_2	H_4	H_6	H_8	$H_{2'}$	$H_{4'}$	$H_{6'}$	$H_{8'}$	荷 重 項
4.702635	2.014305	1.988776	1.976869	1.255036	1.297863	1.323392	1.335300	$100(\delta_{20}^{HT} - \delta_{20}^{HF})$
2.014305	5.269872	2.590630	2.574892	1.297863	1.354465	1.388205	1.403942	$100(\delta_{40}^{HT} - \delta_{40}^{HF})$
1.988776	2.590630	5.855989	3.188653	1.323392	1.388205	1.435015	1.456848	$100(\delta_{60}^{HT} - \delta_{60}^{HF})$
1.976869	2.574892	3.188653	6.469750	1.335300	1.403942	1.456848	1.487920	$100(\delta_{80}^{HT} - \delta_{80}^{HF})$
1.255036	1.297863	1.323392	1.335300	4.702635	2.014305	1.988776	1.976869	$100(\delta_{2'0}^{HT} - \delta_{2'0}^{HF})$
1.297863	1.354465	1.388205	1.403942	2.014305	5.269872	2.590630	2.574892	$100(\delta_{4'0}^{HT} - \delta_{4'0}^{HF})$
1.323392	1.388205	1.435015	1.456848	1.988776	2.590630	5.855989	3.188653	$100(\delta_{6'0}^{HT} - \delta_{6'0}^{HF})$
1.335300	1.403942	1.456848	1.487920	1.976869	2.574892	3.188653	6.469750	$100(\delta_{8'0}^{HT} - \delta_{8'0}^{HF})$

表-8 Case 3 の場

X_2	X_4	X_6	X_2'	X_4'	X_6'	H_2	H_4
2.564495	3.111557	1.975630	-2.015290	-2.459750	-1.562426	0.002679	0.007143
3.111557	4.542709	3.111557	-2.459750	-3.577716	-2.459750	0.001786	0.007143
1.975630	3.111557	2.564495	-1.562426	-2.459750	-2.015290	0.000893	0.003571
-2.015290	-2.459750	-1.562426	2.564495	3.111557	1.975630	—	—
-2.459750	-3.577716	-2.459750	3.111557	4.542709	3.111557	—	—
-1.562426	-2.459750	-2.015290	1.975630	3.111557	2.564495	—	—
0.002679	0.001786	0.000893	—	—	—	0.047026	0.020143
0.007143	0.007143	0.003571	—	—	—	0.020143	0.052699
0.009821	0.012500	0.008036	—	—	—	0.019888	0.025906
0.010714	0.014286	0.010714	—	—	—	0.019769	0.025749
—	—	—	0.002679	0.001786	0.000893	0.012550	0.012979
—	—	—	0.007143	0.007143	0.003571	0.012979	0.013545
—	—	—	0.009821	0.012500	0.008036	0.013234	0.013882
—	—	—	0.010714	0.014286	0.010714	0.013353	0.014039

iii) 鉛直、および水平荷重配分作用を同時に考慮する場合 (Case 3)

この場合には、 X と H を同時に考慮するから、変形の連続条件は、鉛直と水平との両方向について成立させなければならない。これを格点 2 について示せば、鉛直方向の変形に対しては、表-2, 4 より

$$\begin{aligned}
 & 2.540157 X_2 + 3.088322 X_4 + 1.962426 X_6 \\
 & - 2.015290 X_2' - 2.459750 X_4' - 1.562426 X_6' \\
 & + \delta_{20}^{VF} \\
 = & -0.024338 X_2 - 0.023235 X_4 - 0.013204 X_6 \\
 & - 0.002679 H_2 - 0.007143 H_4 - 0.009821 H_6 \\
 & - 0.010714 H_8 + \delta_{20}^{VT} \dots\dots\dots(3)
 \end{aligned}$$

となり、したがって、

$$\begin{aligned}
 & 2.564495 X_2 + 3.111557 X_4 + 1.975630 X_6 \\
 & - 2.015290 X_2' - 2.459750 X_4' - 1.562426 X_6' \\
 & + 0.002679 H_2 + 0.007143 H_4 + 0.009821 H_6 \\
 & + 0.010714 H_8 \\
 = & \delta_{20}^{VT} - \delta_{20}^{VF} \dots\dots\dots(3')
 \end{aligned}$$

となる。つぎに、水平方向の変形に対しては、表-3, 5 を用いて、

$$\begin{aligned}
 & 0.042264 H_2 + 0.015381 H_4 + 0.015126 H_6 \\
 & + 0.015007 H_8 + 0.012550 H_2' + 0.012979 H_4' \\
 & + 0.013234 H_6' + 0.013353 H_8' + \delta_{20}^{HF} \\
 = & -0.002679 X_2 - 0.001786 X_4 - 0.000893 X_6 \\
 & - 0.004762 H_2 - 0.004762 H_4 - 0.004762 H_6 \\
 & - 0.004762 H_8 + \delta_{20}^{HT} \dots\dots\dots(4)
 \end{aligned}$$

となり、これを整理すれば、

$$\begin{aligned}
 & 0.002679 X_2 + 0.001786 X_4 + 0.000893 X_6 \\
 & + 0.047026 H_2 + 0.020143 H_4 + 0.019888 H_6 \\
 & + 0.019769 H_8 + 0.012550 H_2' + 0.012979 H_4' \\
 & + 0.013234 H_6' + 0.013353 H_8' \\
 = & \delta_{20}^{HT} - \delta_{20}^{HF} \dots\dots\dots(4')
 \end{aligned}$$

が得られる。式中の δ_{20}^{VF} , δ_{20}^{VT} , δ_{20}^{HF} および δ_{20}^{HT} は、Case 1 および Case 2 の場合と同一のものである。残りの格点についても、式 (3'), (4') と同様の式を立

て整理すれば、表-8 に示す弾性方程式を得る。

(4) 弾性方程式の荷重項とこれに対する解

弾性方程式の右辺である荷重項は、与えられた外荷重による基本系の不静定力の作用点の変形量、 δ_{i0}^{VF} , δ_{i0}^{VT} , δ_{i0}^{HF} および δ_{i0}^{HT} から求められるが、これらの各 δ_{i0} の値は、荷重を与えることによって、(2) におけると同様に計算できる。通常的设计計算においては、荷重は一般に床組上だけに載荷される場合が多いから、このような載荷状態についてのみ考慮することにすれば、 δ_{i0}^{VT} および δ_{i0}^{HT} は常に 0 となる。また、このような載荷状態で、鉛直荷重に対しては $\delta_{i0}^{HF} = 0$ 、橋軸方向の水平荷重に対しては $\delta_{i0}^{VF} = 0$ となる。したがって、鉛直荷重だけが載荷された場合には、Case 2 の弾性方程式 (表-7) の荷重項が、また、水平荷重だけが載荷された場合には、Case 1 の弾性方程式 (表-6) の荷重項が、それぞれ 0 となり、有意解が得られなくなる。このことは、鉛直荷重配分作用と、水平荷重配分作用とを、それぞれ単独に取りあげて解析することが不適当なことを意味している。一方、斜荷重が載荷された場合には、 δ_{i0}^{VF} も δ_{i0}^{HF} もともに 0 にはならないが、この場合でも、Case 1 と Case 2 とを別個に解いた場合の解は正解値を与えない。そこで、このような場合にはつぎのようにして近似解を求めることにする。すなわち、鉛直荷重だけが載荷された場合を例にとれば、 $\delta_{i0}^{VT} = \delta_{i0}^{HF} = \delta_{i0}^{HT} = 0$ となり、Case 2 の解が得られないが、この場合、まず、Case 1 の解を求め、この不静定力 X がトラスに作用した場合のトラスの格点の水平変位を計算して、これを δ_{i0}^{HT} として Case 2 の荷重項を求め、これから不静定力 H を求めるのである。このことは、このような載荷状態に対する、Case 3 の弾性方程式 (表-8) の $\delta_{i0}^{VT} = \delta_{i0}^{HF} = \delta_{i0}^{HT} = 0$ としたものを

$$\left. \begin{aligned}
 & A_{11} X + A_{12} H = A_{10}^{VF} \\
 & A_{21} X + A_{22} H = 0
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

とあらわした場合、まず、 $A_{12} = 0$ として第 1 式から X を求め、この X の値を第 2 式に代入して H を求める

合の弾性方程式

H_0	H_8	H_2'	H_4'	H_6'	H_8'	荷 重 項
0.009821	0.010714	—	—	—	—	$\delta_{20}VT - \delta_{20}VF$
0.012500	0.014286	—	—	—	—	$\delta_{40}VT - \delta_{40}VF$
0.008036	0.010714	—	—	—	—	$\delta_{60}VT - \delta_{60}VF$
—	—	0.002679	0.007143	0.009821	0.010714	$\delta_{2'0}VT - \delta_{2'0}VF$
—	—	0.001786	0.007143	0.012500	0.014286	$\delta_{4'0}VT - \delta_{4'0}VF$
—	—	0.000893	0.003571	0.008036	0.010714	$\delta_{6'0}VT - \delta_{6'0}VF$
0.019888	0.019769	0.012500	0.012979	0.013234	0.013353	$\delta_{20}HT - \delta_{20}HF$
0.025906	0.025749	0.012979	0.013545	0.013882	0.014039	$\delta_{40}HT - \delta_{40}HF$
0.058560	0.031887	0.013234	0.013882	0.014350	0.014568	$\delta_{60}HT - \delta_{60}HF$
0.031887	0.064698	0.013353	0.014039	0.014568	0.014879	$\delta_{80}HT - \delta_{80}HF$
0.013234	0.013353	0.047026	0.020143	0.019888	0.019769	$\delta_{2'0}HT - \delta_{2'0}HF$
0.013882	0.014039	0.020143	0.052699	0.025906	0.025749	$\delta_{4'0}HT - \delta_{4'0}HF$
0.014350	0.014568	0.019888	0.025906	0.058560	0.031887	$\delta_{6'0}HT - \delta_{6'0}HF$
0.014568	0.014879	0.019769	0.025749	0.031887	0.064698	$\delta_{8'0}HT - \delta_{8'0}HF$

ことにほかならない。したがって、Case 1 の結果が厳密解に近ければ、このようにして求めた Case 2 の解もまた、厳密解に近いはずである。水平荷重、および、斜荷重に対しても、上述の考え方に準じて取り扱えばよいが、以後の計算はすべて鉛直荷重を対象として行なう。

いま、床組の格点 3, 5 および 7 に、それぞれ単位集中荷重を作用させた場合と、二本の縦桁上に橋軸方向の単位分布荷重を満載した場合とについて計算を進めることにすると、上述のように、Case 2 の荷重項は 0 となり、Case 1 および Case 3 の荷重項は $\delta_{i0}VF$ だけになる。各載荷状態に対して $\delta_{i0}VF$ を計算して Case 1 および Case 3 の荷重項を示せば、表-9 のようである。

表-9 Case 1 および 3 の荷重項
(単位・cm/t)

載荷状態 荷重項	P=1 on 3	P=1 on 5	P=1 on 7	q=1 on ST.
$-\delta_{20}VF$	-1.015330	-1.238968	-0.787477	-9.771429
$-\delta_{40}VF$	-1.238968	-1.802807	-1.238968	-13.714287
$-\delta_{60}VF$	-0.787477	-1.238968	-1.015330	-9.771429
$-\delta_{2'0}VF$	0.501044	0.610396	0.387477	-9.771429
$-\delta_{4'0}VF$	0.610396	0.888521	0.610396	-13.714287
$-\delta_{6'0}VF$	0.387477	0.610396	0.501044	-9.771429

注： $\delta_{i0}VT = \delta_{i0}HF = \delta_{i0}HT = 0$, q=1 on ST. の場合のみ単位は cm^2/t となる。

表-9 の値を、表-6, 8 の弾性方程式の右辺に代入して、それぞれの荷重状態に対する解を求めると、不静定力の値として、表-10, 11 を得る。

つぎに、Case 1 の結果(表-10)を用いて、前述のようにして、Case 2 に対する荷重項を計算すると、

表-10 Case 1 の弾性方程式の解

載荷状態 不静定力	P=1 on 3	P=1 on 5	P=1 on 7	q=1 on ST.
X_2	-0.5721	-0.0703	0.0119	-6.2052
X_4	-0.0594	-0.5444	-0.0594	-5.8292
X_6	0.0119	-0.0703	-0.5721	-6.2052
X_2'	-0.2458	-0.0642	0.0105	-6.2052
X_4'	-0.0546	-0.2213	-0.0546	-5.8292
X_6'	0.0105	-0.0642	-0.2458	-6.2052

注：q=1 on ST. の場合の単位は cm

表-11 Case 3 の弾性方程式の解

載荷状態 不静定力	P=1 on 3	P=1 on 5	P=1 on 7	q=1 on ST.
X_2	-0.5732	-0.0714	0.0113	-6.2347
X_4	-0.0598	-0.5449	-0.0598	-5.8453
X_6	0.0114	-0.0713	-0.5731	-6.2347
X_2'	-0.2466	-0.0650	0.0101	-6.2347
X_4'	-0.0549	-0.2219	-0.0549	-5.8453
X_6'	0.0100	-0.0651	-0.2467	-6.2347
H_2	-0.0380	-0.0674	-0.0482	-1.8016
H_4	0.0304	0.0115	-0.0131	0
H_6	0.0661	0.0923	0.0576	1.8016
H_8	0.0715	0.1119	0.0961	2.4264
H_2'	-0.0392	-0.0550	-0.0379	-1.8016
H_4'	-0.0012	-0.0115	-0.0161	0
H_6'	0.0200	0.0302	0.0195	1.8016
H_8'	0.0238	0.0420	0.0374	2.4264

注：q=1 on ST. の場合の単位は cm

表-12 Case 2 の荷重項
(単位・cm/t)

載荷状態 荷重項	P=1 on 3	P=1 on 5	P=1 on 7	q=1 on ST.
100 $\delta_{20}HT$	0.162799	0.122324	0.058507	3.257064
100 $\delta_{40}HT$	0.446861	0.464185	0.238276	10.812117
100 $\delta_{60}HT$	0.626630	0.806046	0.522338	18.367169
100 $\delta_{80}HT$	0.685137	0.928370	0.685137	21.624232
100 $\delta_{2'0}HT$	0.074657	0.062457	0.028890	3.257064
100 $\delta_{4'0}HT$	0.210831	0.226895	0.119297	10.812117
100 $\delta_{6'0}HT$	0.301238	0.391333	0.255471	18.367169
100 $\delta_{8'0}HT$	0.330128	0.453790	0.330128	21.624232

注： $\delta_{i0}HF = 0$, q=1 on ST. の場合のみ単位は cm^2/t

表-13 Case 2 の弾性方程式の解

載荷状態 不静定力	P=1 on 3	P=1 on 5	P=1 on 7	q=1 on ST.
H_2	-0.0378	-0.0672	-0.0480	-1.7946
H_4	0.0304	0.0115	-0.0131	0
H_6	0.0660	0.0920	0.0575	1.7946
H_8	0.0713	0.1116	0.0958	2.4167
H_2'	-0.0390	-0.0548	-0.0377	-1.7946
H_4'	-0.0012	-0.0115	-0.0161	0
H_6'	0.0198	0.0300	0.0193	1.7946
H_8'	0.0236	0.0417	0.0372	2.4167

注：q=1 on ST. の場合の単位は *cm

表-12 のようになる。

表-12 の値を、表-7 の弾性方程式の右辺に代入して解けば、不静定力の値として、表-13 を得る。

これらの不静定力の値を用いて、はしがきにかかげた諸項について解析した結果を以下に示し、考察する。

(5) 結果と考察

i) 解析法について

表-11 の厳密解の値と、表-10 および 表-13 の値とを直接比較することによって、それぞれの解析法の妥当性を検討することができる。

まず、表-10 と表-11 の X の値とを比較して、

a) 各載荷状態を通じて、両者の値はよい一致を示しており、特殊な点を除いて 表-10 の値は 表-11 の厳密解の値と比較して、わずかに1%前後小さくなっているにすぎない。

b) 単位集中荷重を載荷した場合、載荷点からもっとも離れた点(たとえば、格点3に載荷した場合の格点6, 6')では、表-10 の値が約4%強、大きくなるが、このような点では、不静定力の値そのものが他の点の値に比較して小さいから、全体に大きな影響をおよぼさない。などの点が考察される。

つぎに、表-13 と表-11 の H の値とを比較した場合、その値にはほとんど差がなく、高々、1%弱、表-13 の値が小さくなっていることがうかがわれる。

以上のことから、鉛直荷重が載荷された場合の主構と床組との協力作用を解析する方法として、

イ) 鉛直荷重配分作用の計算は、桁並列橋の場合と同様に、単独に取り扱ってよい。

ロ) 水平荷重配分作用の計算においては、弾性方程式の係数行列は、本文におけると同様に X に無関係に立ててもよいが、その荷重項は、イ) で求めた X をトラスに作用させて、格点の水平変位を計算して求める。

ハ) 両作用を同時に考慮して総合的な解析を望む場合にも、本文における Case 3 のようにする必要はなく、イ) と ロ) とを別個に行なって、その結果を重ね合わせればよい。

ことが結論づけられる。このようにすれば、いたずらに元数の多い連立方程式を解くことなく、厳密解析に近い結果が期待できる。Case 3 を直接解かないで、このように、Case 1 と Case 2 とに分割して解くことは、(4) に述べたように、式(5)を解く場合、block-iteration とよぶべき方法で、第一近似値を求めたことに相当するが、力学的な解釈をすれば、鉛直荷重配分作用と水平荷重配分作用とを、たがいに独立させて、解析しようとしたことになる。この意味で、Case 2 の荷重項の計算の際、前述の方法によらないで、通常的设计計算法におけると同様に、横桁を単純ばりとみなして、横桁に

かかる荷重の反力分をトラスに配分して $\delta_{i_0}^{HT}$ を計算して、これを荷重項として用いることにすれば、鉛直荷重配分作用と全く無関係に、水平荷重配分作用を計算することになるが、これは前述したように、元来不適当なことであって、その結果も、厳密解と比較して、5~20%の誤差をとまう。

ii) 床組の荷重配分効果について

a) 鉛直荷重配分効果

鉛直荷重配分作用の結果、トラスに配分される外荷重の割合は、さきに計算した不静定力 X の値が示す通りである。本計算例の場合、横桁を単純ばりとみなす通常の計算法によれば、単位集中荷重が床組の一格点に作用する場合には、載荷点下の横桁端において、載荷側で $X = -2/3$ 、非載荷側で $X = -1/3$ 、他の横桁端では $X = 0$ となり、単位分布荷重を2本の縦桁上に満載した場合には、すべての横桁端において、 $X = -6$ となる。これらの値と、表-10 ないしは、表-11 の X の値と直接比較すれば、その荷重配分の様相は一目瞭然であるが、この分配荷重がトラスの部材力におよぼす影響の相違については、このままでは推定し難い。そこで、筆者らは前述の各載荷状態と、これらの組み合わせられた荷重状態とについて、トラスの全部材の軸力を計算してみた。その結果、本計算例のような下路ワーレントラス橋では、鉛直荷重配分効果は、支点到隣接した斜材を除く、載荷点近傍の中間斜材において特に顕著に現われ、他の部材においては、斜材にみられる以上の効果は認められなかった。以下においては、これらの斜材についてのみ記述する。いま、(4)において考慮した各載荷状態に対する斜材の軸力を、通常の計算法を用いた場合と、Case 3 の厳密解による配分率を用いて計算した場合とについて対比して示せば、表-14 のようである。ただし、この場合不静定力 H の影響は斜材にはあられず、表-11 の X の値からも明らかなように、単位集中荷重が格点7に作用する場合は、格点3に作用する場合とほとんど対称になるので省略する。

表-14 の慣用計算値に対する厳密計算値の百分率を計算してみると、単位分布荷重が作用する場合には、約97%となっており、両計算法の間にはさほど開きはないうが、単位集中荷重が作用する場合には、その載荷点の近傍の斜材において大きな開きがみられる。すなわち、格点3に作用する場合には、載荷側において約70%、非載荷側において約44%、また、格点5に作用する場合には、

表-14 単位荷重による斜材軸力の比較

部材 摘要	P=1 on 3		P=1 on 5		q=1 on ST.	
	慣用計算	厳密計算	慣用計算	厳密計算	慣用計算	厳密計算
$D_2 = -D_3$	0.2083	0.1453	-0.4167	-0.3406	-3.7500	-3.6533
$D_1 = -D_5$	0.2083	0.2200	0.4167	0.3406	3.7500	3.6533
$D_2' = -D_3'$	0.1042	0.0459	-0.2083	-0.1387	-3.7500	-3.6533
$D_1' = -D_5'$	0.1042	0.1145	0.2083	0.1387	3.7500	3.6533

表-15 X による軸力と、H による軸力との比較

部 材	P=1 on 3		P=1 on 5		P=1 on 7		q=1 on ST.	
	X による	H による	X による	H による	X による	H による	X による	H による
L ₁	0.3427	-0.1301	0.2579	-0.1482	0.1235	-0.0924	6.8680	-2.4264
L ₂	0.5982	-0.1681	0.7201	-0.2157	0.3790	-0.1406	15.9279	-4.2280
L ₃	0.3790	-0.1376	0.7201	-0.2042	0.5981	-0.1537	15.9279	-4.2280
L ₄	0.1235	-0.0715	0.2578	-0.1119	0.3427	-0.0961	6.8680	-2.4264
L ₁ '	0.1574	-0.0034	0.1320	-0.0056	0.0612	-0.0029	6.8680	-2.4264
L ₂ '	0.2874	-0.0426	0.3472	-0.0607	0.1911	-0.0408	15.9279	-4.2280
L ₃ '	0.1911	-0.0438	0.3472	-0.0721	0.2874	-0.0569	15.9279	-4.2280
L ₄ '	0.0612	-0.0238	0.1320	-0.0420	0.1575	-0.0374	6.8680	-2.4264

載荷側において約 82%，非載荷側において約 67% となる。このことから、活荷重に対する鉛直荷重配分効果は、斜材においては見逃すことはできないといえよう。床組を格子構造とみなした場合、荷重は単に幅員方向だけでなく、橋軸方向にも配分されるから、現行の設計荷重のような幅員方向の線荷重に対しても、これを考慮する必要がある。前述したように、鉛直荷重配分作用の計算は、桁橋におけると全く同様に取り扱うことができるから、格子桁橋などに関する幾多の資料を参考にし、配分荷重を求めて解析することがより実情に近い結果をもたらすであろう。

b) 水平荷重配分作用

水平荷重配分作用の影響は、下路橋の場合には下弦材だけに現われるから、以下においては、下弦材についての記述する。いま、(4)で考慮した荷重が作用する場合について、Case 3 で求めた不静定力のうち、X だけを考慮した場合と、H だけを考慮した場合とに対する下弦材の軸力を対比して示せば、表-15 のようである。

表-15 において、左欄は X のみが作用した場合、右欄は H のみが作用した場合の値である。したがって、X と H とを同時に考慮する場合には、左右の欄の和が下弦材の軸力となる。ゆえに左欄に対する右欄の割合は、水平荷重配分作用による下弦材の軸力の減少率を意味する。この減少率を百分率で表わしてみると、表-16 のような値となる。

表-16 をみて水平荷重配分作用がいかに大きく下弦材に影響するかがわかるであろう。表-16 の値には、かなりばらつきがあって、一概には論じられないが、いま、これらの値の平均値をとってみると、単位分布荷重

表-16 水平荷重配分作用による軸力の減少率 (%)

載荷状態	P=1 on 3	P=1 on 5	P=1 on 7	q=1 on ST.
L ₁	38.0	57.5	74.8	35.3
L ₂	28.1	30.0	37.1	26.5
L ₃	36.3	28.4	25.7	26.5
L ₄	57.9	43.4	28.0	35.3
L ₁ '	2.2	4.2	4.7	35.3
L ₂ '	14.8	17.5	21.4	26.5
L ₃ '	22.9	20.8	19.8	26.5
L ₄ '	38.9	31.8	23.7	35.3

の場合には約 31%，単位集中荷重の場合には載荷側で約 40%，非載荷側で約 19%，全体で約 29% となる。したがって、強いて結論づけるならば、下弦材の軸力は水平荷重配分作用によって、これを考慮しない場合の、平均約 30% が有効に減少するといえる。表-16 は、鉛直荷重配分作用の影響を含めた値についての比較であるが、前述のように、この影響は中間斜材に対して大きく、下弦材に対しては小さいから、慣用計算法による結果と比較した場合とほとんど変わらない。

本計算例と、文献 6) に示された値とを比較するため、単位集中荷重が中央の格点 5, 5' に同時に作用した場合の減少率を計算してみると、L₁, L₄ で約 40%，L₂, L₃ で約 26% となって、同様の結果が得られていることがわかる。このような値は、トラスの形式や、床組と主構との断面比などによって異なってくることはいうまでもなく、ここで得られた値をそのまますべてのトラス橋にあてはめることはできない。しかしながら、実在のトラス橋における床組と主構との断面比には限られた範囲があり、また、その形式もさほど多くはない。したがって、文献 6) における結果と、本計算例における結果とがほぼ同様の値を示したことからしても、実在橋に対しても上述の程度の水平荷重配分作用の効果は期待してもよいと考えられる。参考までに、単純支持の下路トラス橋について、既往の載荷実験結果の中から、二、三の橋について主要部材の応力比を示せば、表-17 のようである。

表-17 から、実在のトラス橋においても、下弦材の応力比が、他の部材のそれに比較していちじるしく小さいことがわかるであろう。いま、かりに、水平荷重配分作用によって下弦材の軸力が 30% 減少したものととして、応力比の平均をとってみると、牛立架道橋⁷⁾で 96%，木曾川橋梁⁸⁾で 93%，吉野川橋⁸⁾で 87%，那賀川橋⁹⁾で 70

表-17 既設トラス橋の応力比 (%)

橋 種	鉄 道 橋		道 路 橋	
	宝 塚 線 牛立架道橋	関 西 線 木曾川橋梁	吉 野 川 橋	那 賀 川 橋
上 弦 材	—	81~94	100~112	87~93
下 弦 材	66	59~66	42~71	37~42
斜 材	90	76~99	83~99	82~99
鉛 直 材	89	86~91	77~89	66~103

％となって、他の部材の応力比の平均値とほぼ一致する。このことから、橋の様式が多小異なっている、平均して約30%の水平荷重配分効果は見込んでよいことが推察される。表-17において、鉄道橋の場合よりも、道路橋の場合の方がさらに小さな下弦材応力比を示していることは、床版の影響が加味されたものと考えられ、この点については、床版を考慮に入れた解析を行なって検討する必要がある。

下弦材は常に引張材として設計できるから、他の部材と違って細長比にほとんど支配されずに、断面を決定することができる。したがって、トラス橋の経済的な設計を望むならば、このような床組の重要な役割を看過すべきではない。電子計算機を利用すれば、前述のような解析も比較的容易にできるから、今後の設計に際しては、以上の事実を十分考慮することが望ましい。

iii) 縦桁の断面力について

縦桁の設計曲げモーメントに対する検討は、文献3)に詳細に述べられており、また、現行の設計示方書にもその規準が示されているので割愛し、ここでは、分布荷重が載荷された場合の曲げモーメントと、水平荷重配分作用の結合縦桁に生じる軸力とによる合成応力度に注目して考察する。いま、分布荷重 $q=1\text{ t/m}$ が、2本の縦桁上に満載された場合について、図-2の断面を用いて最大曲げ応力度を計算すると、 $\sigma_{\max}^M = \pm 99\text{ kg/cm}^2$ となり、これの生ずる位置における軸応力度は、 $\sigma^N = +16\text{ kg/cm}^2$ となる。これに対し、最大軸応力度の生じる位置での曲げ応力度は $\sigma^M = \pm 93\text{ kg/cm}^2$ となり、そのときの軸応力度は $\sigma_{\max}^N = +28\text{ kg/cm}^2$ となる。ちなみに、曲げ応力度に対する軸応力度の割合を計算してみると前者で16.2%、後者で30.1%となり、かなり大きな割合を占めていることがわかる。また、合成応力度は上下フランジにおいて、それぞれ、前者は -83 kg/cm^2 、 $+115\text{ kg/cm}^2$ 、後者は -65 kg/cm^2 、 $+121\text{ kg/cm}^2$ となる。一方、縦桁を格間ごとに単純ばりとみなした慣用計算値は上下フランジにおいて $\pm 110\text{ kg/cm}^2$ となり、下フランジで本解析法による結果が4~10%上まわっている。

以上から、縦桁は単なる曲げ材としてでなく、曲げと軸力とを同時に受ける部材として設計すべきことが推察されよう。また、これと同時に、横桁は橋軸方向の力を受け、水平面内での曲げを受けるから、これに対する注意も肝要である。なお、ここでは単に分布荷重が載荷された場合の一例について考慮したにすぎないが、実際の設計にあたっては、活荷重によって生じる曲げ応力度と軸応力度についても、十分検討する必要があることはいうまでもない。

4. む す び

以上、両端単純支持の下路ワーレントラス橋を例

にとって、その立体的な解析法と、床組のもつ二、三の重要な役割について考察してきたが、これを要約すると以下になる。

a) 鉛直荷重配分作用と、水平荷重配分作用とは、それぞれ、単独に取り上げて弾性方程式をたてて解析してよいが、その場合、(4)に述べたような荷重項の取り扱い方をすれば、高精度の近似解が得られる。

b) 鉛直荷重配分効果は、本例のようなワーレントラス橋では、斜材にいちじるしく表われる。

c) 水平荷重配分効果はいちじるしく、下弦材の軸力の減少率は、平均約30%にも達する。

d) 縦桁に生ずる軸応力度は、曲げ応力度に対してかなりの割合を占めるから、縦桁は曲げと同時に軸力を受ける部材として設計する必要がある。

e) 横桁は橋面内での水平曲げを受けるから、設計に際しては、この点に注意して換算する必要がある。

以上のうち、床組の水平荷重配分効果については、実験的に古くから気付かれていたことであり、本研究は、これに対する理論的な解釈をつけたにすぎないが、この一文が今後の設計に対する一資料ともなれば幸いである。結論的にかかげた諸数値も、単なる一計算例についてのものであり、一般性を帯びたものとはいえないが、実験例における諸数値とも参照してご賢察いただきたい。ここで述べた解析法は、下路橋についてのものであるが、解析上の仮定をいくぶん変更することによって、上路橋にも適用できるし、また、アーチ系の橋梁にも適用できる。

本研究の計算には、名古屋大学電子計算機 NEAC-2203 を利用したが、計算機の利用に協力された名古屋大学の中川講師(工学部土木工学教室)ならびに、以後の計算に協力された徳島大学の安芸研究生(三井造船鉄構部)に対して、この紙面を借りて深謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 長谷川鑑一: "格子補剛アーチ修善寺橋の設計について", 第5回道路会議論文集, (昭.34), pp. 647-649.
- 2) 明石・長谷川・原田: "格子構造の補剛桁を有するアーチ橋について", 第20回土木学会年次学術講演会概要, (昭.40), I-77.
- 3) 佐々木・高尾: "トラスのたわみによる縦げたの付加的影響について", KSK 技報, Vol. 9, No. 3 (1960), pp. 20-26.
- 4) B. Fritz: "Über des elastische Zusammenwirken von Fahrbahnrost und Bogenträger", Der Stahlbau, Heft 16/17 (1944), S. 71-76.
- 5) R. Schau: "Hohenzollernbrücke Köln-Wiederherstellung des 3. und 4. Gleises", Der Stahlbau, Heft 10 (1959), S. 261-265, Heft 12 (1959), S. 321-331.
- 6) 橋本香一: "トラスの応力, たわみおよび振動", 鉄道業務研究資料, 9, 13 (昭.27), pp. 4-16.
- 7) 成岡昌夫: "応力測定法と鋼橋の実験応力解析学的研究", 土木学会関西支部橋梁工学講習会テキスト, (昭.29) p. 17.
- 8) 星・楯本: "吉野川橋の応力測定について", 第16回土木学会年次学術講演会概要, (昭.36), II-12.
- 9) 二級国道高知徳島線, 徳島県那賀郡羽の浦町に架設されているワーレントラス橋で, 昭和37年に徳島大学の手によって実験された。(1955.10.20・受付)