

(47) 多主桁合成桁橋の三次元的挙動解析について

AN ANALYSIS OF THE 3-DIMENSIONAL BEHAVIOR OF COMPOSITE GIRDER BRIDGES

山尾敏孝* 崎元達郎** 湯治秀郎*** 川井 豊***

By Toshitaka YAMAO, Tatsuro SAKIMOTO, Syuro YUZI and Yutaka KAWAI

A simple method for analyzing the 3-dimensional behavior as a whole system and local stresses of composite girder bridges is presented. The method is based on a finite element technique which can connect the plate elements with a beam-column element. The analytical studies of composite girder bridges with three main girders and cross beams or cross frames by using the present method are carried out to investigate the influence of stiffness of the cross beam and the cross frame on the deflection of the floor slab and the effects of shear connectors between the floor slab and steel girders. Validity and efficiency of the present method are shown.

1. まえがき

橋梁構造物としてよく利用されている合成桁橋において、鉄筋コンクリート床版（以後RC床版とよぶ）のひび割れや使用鋼材の腐食などさまざまな損傷が報告されており¹⁾、この損傷に対して合理的かつ経済的な補修、補強対策が求められている。しかし、この合理的な補修や補強方法を決定するには、このような橋梁構造物の損傷度や劣化度を的確に判定し、補修時期を正しく推定できる方法の開発が望まれており、多くの研究がなされている²⁾。このように橋梁構造物の損傷度や劣化度を正しく評価し、合理的な補修、補強をするには、まず構造物の全体挙動や局所の応力状態を横桁や対傾構の剛性を考慮して正確に把握する必要があると思われ、有限要素法を用いた種々の解析法が開発が行われている。そこで、著者らは鋼桁とRC床版からなる合成I桁橋の全体挙動を、横桁や対傾構の剛性を考慮して解析できる手法として、RC床版を板要素に鋼桁を薄肉はり要素にそれぞれモデル化し両者を結合して解析する方法を提案した³⁾。特に、鋼桁とRC床版の間のずれ止めによる弾性変形をばね定数を含む剛性マトリックスで表して、不完全な合成作用も考慮できるようにし、この解析手法の有効性や精度について検討してきた。

本研究では、本手法を用いて並列多主桁とRC床版からなる合成桁橋の全体挙動や応力状態を、横桁や対傾構の剛性を考慮して解析を行った。解析結果と実験結果等との比較により本解析法の妥当性や有効性

* 工博 熊本大学助教授 工学部土木環境工学科 ** 工博 熊本大学教授 工学部土木環境工学科
*** 川崎製鉄(株) エンジニアリング事業部

について検討を行った。なお、対傾構については横桁と同様な働きをするので、1格間の対傾構を片持ちトラスと考えるとこのトラスと同じ曲げ剛性を有するはり要素に置換して計算した。さらに、実橋梁で用いられる程度の寸法をもつ3主桁の合成桁のモデルを用いて、RC床版の剛度および横桁の剛度とずれ止め係数つまり合成効果の関係について検討したものである。

2. 解析方法の概要

鋼桁とRC床版及び横桁よりなる合成I桁橋の全体挙動を解析する手法については文献3)に報告した。つまり、RC床版は等方性板の三角形平面応力要素と鉄筋を考慮した直交異方性板の三角形平板曲げ要素からなる1節点6自由度の三角形板要素とする。また、鋼桁は床版の板要素と同じ長さに分割し、鋼桁の中立軸を代表させた1節点7自由度の薄肉はり要素とする。なお、横桁及び対傾構は鋼桁の

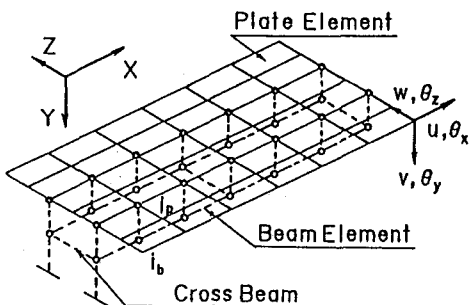


図1 合成桁解析モデル

中立軸上の節点間を結んだはり要素とする。図1は合成桁の解析モデル化の例を示すが、床版の中立面及び鋼桁の中立軸の変形状態を考え、はり要素の全節点変位を床版に結合している板要素の節点変位に置き換えてしまう方法である。このとき板要素の全節点変位を独立変位 $\{\delta_n\}$ 、はり要素の全節点変位を従属変位 $\{\delta_m\}$ とし、両者を結ぶ結合マトリックスを $[G_m]$ とするとつり合い式は次式で表される。

$$\{F_n\} = [K_{nn}] \cdot \{\delta_n\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここに、} \quad [K_{nn}] &= [\bar{K}_{nn}] + [G_m]^T \cdot [K_{mm}] \cdot [G_m] \\ \{F_n\} &= \{\bar{F}_n\} + [G_m]^T \cdot \{F_m\} \\ \{\delta_m\} &= [G_m] \cdot \{\delta_n\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

なお、 $[K_{nn}]$ 、 $[K_{mm}]$ は剛性マトリックス、 $\{F_n\}$ 、 $\{F_m\}$ は外力ベクトルを表し、 $\bar{\quad}$ は縮小されることを意味する。式(2)の計算により鋼桁の剛性を床版の剛性に組み込むことができ、同じ剛性を持つ板要素のみからなるつり合い方程式が得られる。特に、床版と鋼桁との間に生ずるずれの影響はずれ止めのばね係数を含む剛性を結合マトリックスに組み込むことにより考慮している。また、対傾構は次に示す曲げ剛性を持つはり要素として置換する。この場合図2に示すような1格間の対傾構を片持ちトラスと考え、曲げモーメントを上下弦材が、せん断力を斜材が受け持つとして、片持ちトラスの先端に载荷したときの変位が同じになるような片持ちはりの曲げ剛性を求め、これを対傾構の換算曲げ剛性とする方法である⁵⁾。図2に示す対傾構の上下弦材と斜材の各断面積を A_1 、 A_2 、垂直材は主桁で ∞ とすると、長さ a であるはりの換算曲げ剛性 I_{of} は次式で表わされる。

$$I_{of} = \frac{I_t}{1.0 + \frac{C I_t}{A_2 a^2 \sin \theta}} \quad (3)$$

$$\text{ここに、} \quad I_t = A_1 h^2 / 2$$

$$C = 1.5 (\text{図2(a)})$$

$$3.0 (\text{図2(b)})$$

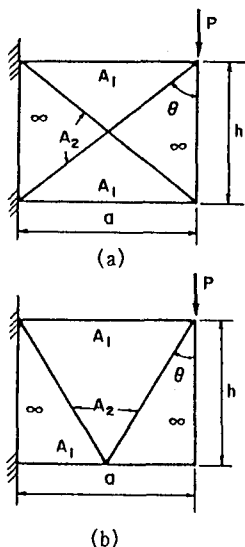


図2 対傾構のモデル化

3. 数値解析結果と考察

(1) 解析手法の検討

単主桁及び2主桁を有する合成桁についての本解析法の妥当性については文献3)で示したので、ここでは佐藤ら⁶⁾の横桁または対傾構を有する3主桁の合成桁の実験供試体を解析モデルとして行った。解析モデルの材料定数やずれ止めのばね係数kは図3に示すように実験と同じものを使用した。板要素の分割方法は橋軸方向に8、橋軸直角方向に6等分し、主鉄筋と配力筋を考慮したRC床版とした。主桁と横桁ははり要素でモデル化し、横桁は中央断面に一ヶ所連結している。荷重は集中荷重 $P=20\text{ tonf}$ をスパン中央の内桁と外桁に載荷した。図4は各載荷状態における中央断面におけるたわみ及びひずみ分布を、図5は中央断面に3点の集中荷重を載荷したときのひずみ分布で、実験値と比較して示したものである。なお、ひずみはスパン中央から50cmの断面の橋軸方向のひずみ分布を示している。これらの結果より内桁、外桁載荷及び横桁の有無にかかわらず、たわみはいずれの場合においても解析値は実験値に比べて多少小さめに計算されているが、ひずみは良く一致しており、両者は非常によい対応を示していることがわかる。次に対傾構を有する場合については、図3のモデルと同じ主桁で床版厚が9cmであり、図6に示すようなL型部材で構成される対傾構を3ヶ所に付けた解析モデルを用いた。対傾構は式(3)により置換したはり要素とした。集中荷重 $P=20\text{ tonf}$ をスパン中央の内桁と外桁に載荷したときのたわみ分布を図6に示す。解析結果は実験値より多少小さめに計算されているが、式(3)の換算曲げ剛性を用いる方法は妥当であることがわかる。

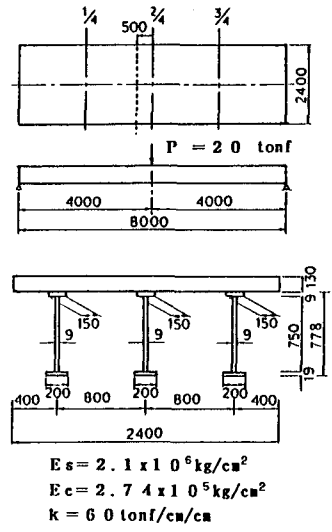


図3 解析モデル1

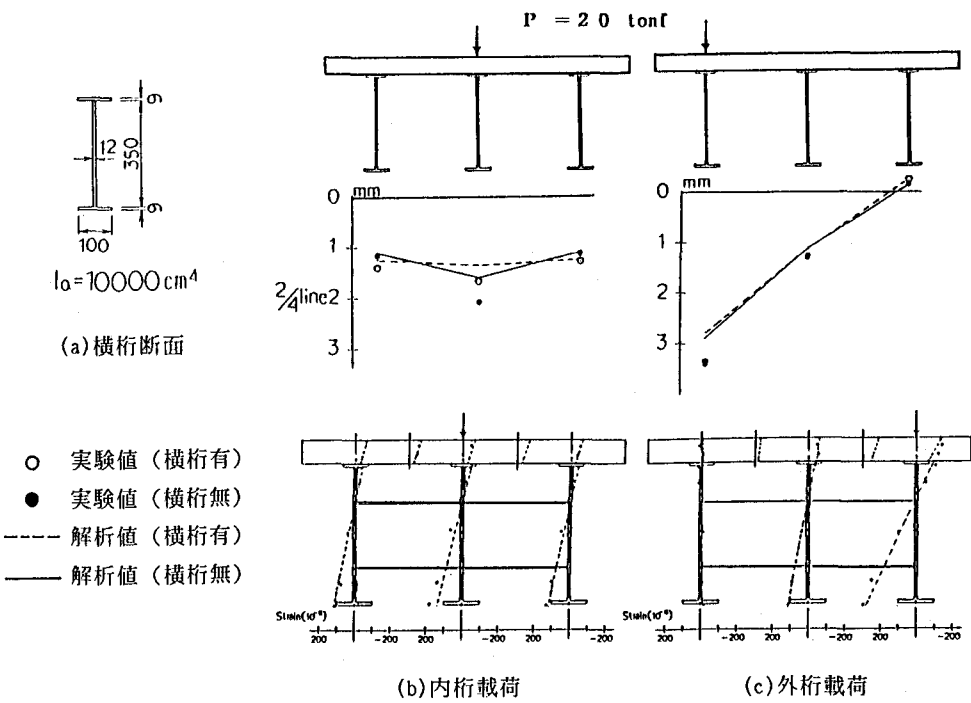


図4 たわみとひずみ分布図

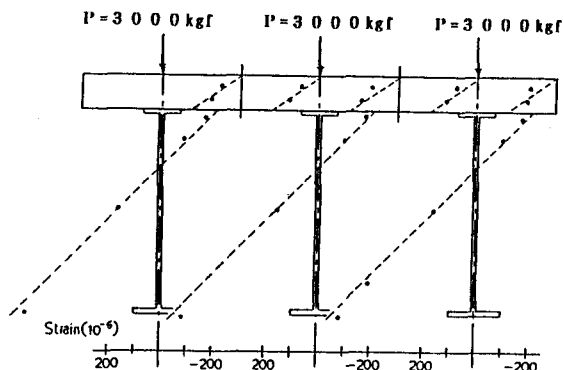


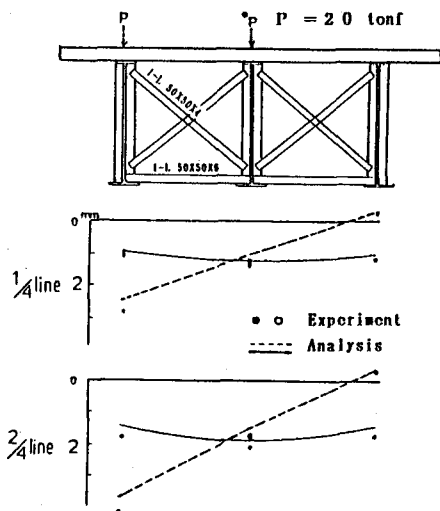
図5 中央断面3点载荷のひずみ分布

(2) 3主桁を有する合成桁の挙動解析

前節の結果より解析方法の妥当性が確認されたので、図7に示すような実橋梁で用いられる断面寸法の合成桁橋をモデルとして解析を行った。パラメータとして単位長さあたりのずれ止めのばね係数、床版厚および横桁の剛性を選んで変化させ、たわみ挙動や鋼桁の軸力及び曲げモーメントの関係を調べた。材料定数は図7に示す。なお、単位長さあたりのばね係数 k は基準ばね係数 k_0 ($=20 \text{ tonf/cm/cm}$)に関する無次元量で表わし、これを合成度 $S = \sqrt{k/k_0}$ として用いた⁴⁾。

図8は集中荷重 $P=10 \text{ tonf}$ をスパン中央の外桁に載荷した場合の载荷位置の鋼桁の軸力 N と曲げモーメント M_z 及び合成度 S の関係を示している。なお、図7に示す位置に横桁と対傾構を付けている。図よりわかるように $S=0$ 時は軸力は大きく曲げモーメントは小さいが、 S の増加につれて軸力はほとんど0になり曲げモーメントは大きくなることがわかる。これは内桁に載荷した場合でも同様な傾向がみられた。つまり、 $S=0$ は完全合成に対応し $S=7$ ではほぼ非合成に対応していることより、軸力は合成効果の低減にともなって低下す

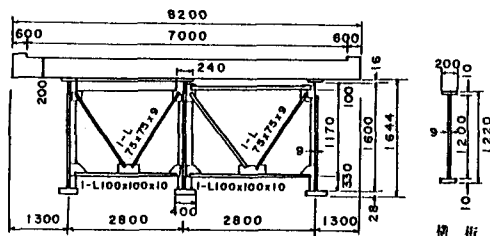
るが曲げモーメントは増加する傾向にある。図9は载荷位置での内桁、外桁の軸力、曲げモーメント及び鉛直たわみ δ と合成度 S の関係を、完全合成($S=0$)の値で無次元化して示したものである。内桁、外桁とも軸力 N/N_0 は $S=7$ ではほぼ0になっており、床版と鋼桁の合成効果がなくなったことがわかる。また、 S が大きくなるにつれて、つまり合成効果が小さくなる場合の影響を最も受け易いのは鋼桁の軸力であり、次にたわみ、曲げモーメントの順であることもわかる。図10には図7の3主桁合成桁のスパン中央に横桁のみを取り付け、中央断面の内桁及び外桁に集中荷重 $P=10 \text{ tonf}$ を載荷したときの横桁の曲げ格子剛度 Z と載荷桁の荷重分配率 ϕ 及びずれ止めのばね係数 k の関係を示したものである。なお、 Z の式の a は主桁間隔、 I_v は合成桁の断面二次モーメントを表わす。荷重分配率を図中に示す式で表わすと分配率は、内桁



$$E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 \quad k = 60 \text{ tonf/cm/cm}$$

$$E_c = 2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2 \quad I_v = 6300 \text{ cm}^4$$

図6 対傾構のある合成桁



$$E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_c = 3.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

図7 解析モデル2

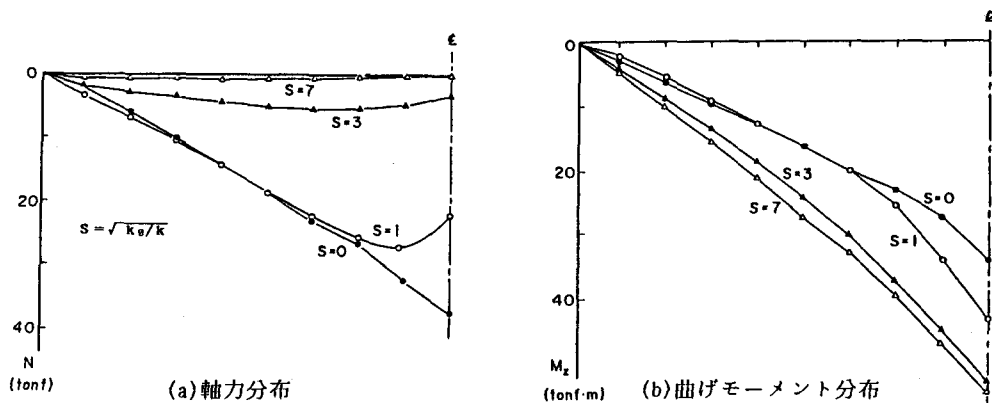


図8 鋼桁の軸力と曲げモーメント図（外桁載荷）

載荷で、通常用いられる Z が10付近で床版のみ ($Z=0$) の場合に比べて10%程度急に減少するが、 Z が大きくなると k の大きさにかかわらずほぼ一定値になっている。これに対し、外桁載荷では Z が10以上の場合 k の大きさにより分配率に差が生じているが、その勾配はほとんど同じである。図11は図10と同じ主桁でスパン中央に横桁 ($Z=9.3$) を1本つけたモデルで中央断面の内桁、外桁に集中荷重 $P=10$ tonf を載荷し、床版厚を16~24cmに変化させたときの載荷桁の荷重分配率 ϕ 及びばね係数の関係を示したものであり、図12はその時のたわみ分布を示したものである。図からわかるように床版厚を大きくすると外桁載荷の場合分配効果がある。通常、この主桁間隔の合成桁の設計では床版厚は22cm程度で、ずれ止め係数は $k > 20$ より分配効果が期待できる。しかしながら、合成効果が小さくかつ床版厚が小さくなると桁全体のたわみが大きくなっていることがわかる。

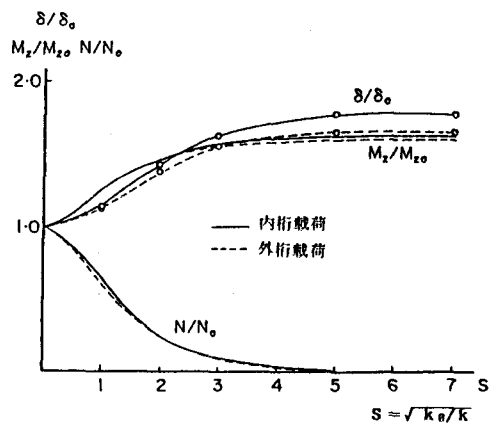


図9 断面力，たわみと合成度の関係

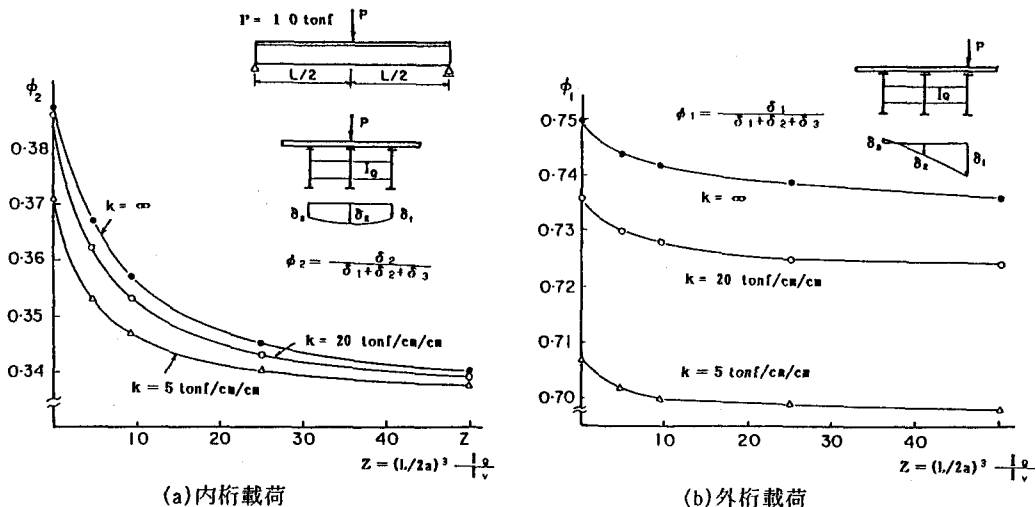


図10 荷重分配率，格子曲げ剛度及びばね係数の関係

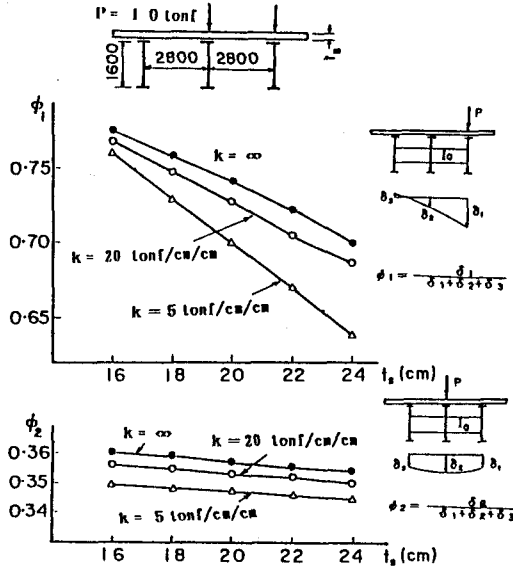


図11 床版厚と分配率及びばね係数の関係

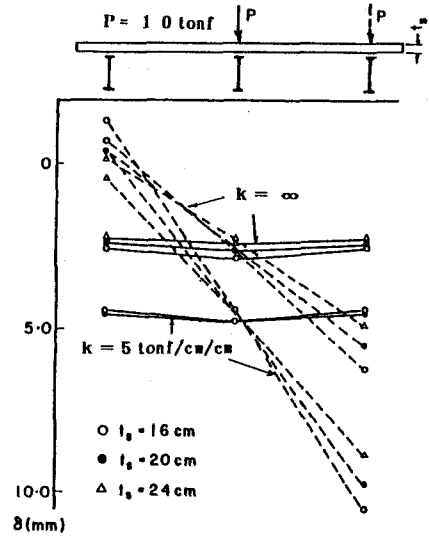


図12 床版厚とたわみ分布の関係

4. あとがき

本論文では、鋼桁とRC床版からなる合成I桁橋の全体挙動を、横桁や対傾構の剛性ならびに鋼桁とコンクリート床版の間に生じるずれを考慮して解析できる本解析法を用いて、3主桁を有する合成桁橋に適用して実験結果との比較検討を行って本法の妥当性を検討した。さらに、実橋梁で用いられる程度の寸法をもつ合成桁橋をモデルに、RC床版の剛度と横桁の剛度及びRC床版と鋼桁の間の合成効果の関係について若干の検討を行ったものである。今後はさらに横構、対傾構を含めた多主桁合成桁橋の全体挙動や局部的な応力状態について解析し、詳しく検討を行いたいと思う。

最後に、本研究を進めるにあたり熊本大学工学部土木工学科のロー・コー・チュン氏（現 間組(株)）及び田中康夫氏（現 福岡県）にご協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鋼構造委員会疲労変状調査小委員会：鋼橋疲労変状調査，土木学会論文集，第365号/1-5，1986.4.
- 2) 土木学会関西支部：既設の橋梁構造およびその構成部材の健全度，耐久性の判定に関するシンポジウム論文集，1983.2.
- 3) 山尾敏孝・崎元達郎・湯治秀郎・川井 豊：合成I桁橋の挙動を求める構造モデルと一解析手法について，構造工学論文集，Vol.35A，pp.1197-1204，1989.3
- 4) 小松定夫・佐々木孝：不完全合成格子桁橋の理論と近似計算法について，土木学会論文報告集，第329号，pp.27-37，1983.1.
- 5) 高島春生：道路橋の横分配実用計算法，現代社
- 6) 奥村敏恵・佐藤政勝：床組と横構の剛度を考慮した合成桁橋の解析，土木学会論文報告集，第222号，pp.1-13，1974.2.