

合成 I 桁橋の挙動を求める構造モデルと —解析手法について

AN ANALYSIS MODEL AND METHOD OF COMPOSITE I-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 finite element method which can analyze the structural behavior of a composite I-girder bridge as a whole system is developed. Reinforced concrete floor slabs are modeled by thin plate elements and main girders are by beam elements with seven degrees of freedom. The stiffness matrix is derived by using a multi-point constraints technique at the nodal points which connect plate elements and a beam element. The effects of shear connectors are included by considering the difference of a horizontal displacement between a floor slab and steel girders. Validity and efficiency of the present method are shown by comparison with experimental results.

1. まえがき

鋼桁とコンクリート床版が一体となって働く合成構造は、材料の特性を生かした合理的な構造物であり、従来から橋梁構造物としてよく利用されている。近年、供用後20～30年たったこれらの橋梁構造物において、鉄筋コンクリート床版（以後RC床版とよぶ）のひび割れ、使用鋼材の腐食や主桁と対傾構が取り付けられている垂直補剛材の溶接部の疲労損傷などさまざまな損傷が報告されており^{1), 2)}、今後さらに事態は深刻化すると思われる。このような橋梁構造物の損傷度や劣化度を合理的に判定し、その補修、補強の時期を正しく推定する方法の開発が望まれており各方面で研究がなされている^{3), 4)}。さらに、損傷を受けた床版の打ち換え工事を行う際には、交通事情により片側車線を供用したままで、もう片側車線を鋼床版に置換する方法が用いられることがあるが、この場合の全体挙動や主桁及び横桁の応力状態はよくつかめていないのが現状である。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部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。これらの解析法の問題点は、板構造である床版と線構造である鋼桁や対傾構を簡潔かつ精度よくモデル化するかということにある。

有限要素法を用いて合成桁の解析を行ったものに佐藤ら⁵⁾、尾下・金子⁶⁾及び増田ら⁷⁾の研究がある。

*	工博	熊本大学助教授	工学部土木環境工学科	(〒860 熊本市黒髪2-39-1)
**	工博	熊本大学教授	工学部土木環境工学科	(〒860 熊本市黒髪2-39-1)
***		川崎製鉄㈱	エンジニアリング事業部	(〒100 東京都千代田区内幸町2-2-3)

佐藤らは床版と鋼桁に三角形平面要素を用いて弾塑性解析を行っている。尾下らは床版を文献12)の1節点6自由度板要素で、鋼桁を薄肉はり要素でそれぞれ表し、両者をオフセットビーム要素により結合した解析法を用い、床版や横構の荷重分配効果を調べている。また、増田らは鋼桁に1節点6自由度の偏心骨組み要素を導入し、床版に文献12)の板要素を用い、対傾構を含む構造をモデル化し解析している。しかし、これらの解析においてはずれ止めの弾性変形による床版と鋼桁のずれは考慮されていないようである。一方、ずれを考慮した不完全合成桁の解析には、浜田・有住⁸⁾、Gustofsonら⁹⁾、Moffattら¹⁰⁾および小松・佐々木¹¹⁾の研究がある。浜田らは一本桁を対象に床版と鋼桁をそれぞれ、軸力と曲げを受ける独立な棒要素とし、ずれ止めを床版と鋼桁の間の水平せん断力のみに抵抗する要素として扱っている。Gustofsonらは多主桁を対象として、床版と鋼桁の偏心を考慮して床版中立面に関する床版の板要素及び鋼桁の棒要素の剛性マトリックスを導き、斜角合成桁橋の解析を行った。Moffattらは長方形矩形平板要素を用いて不完全合成桁及び不完全合成箱桁橋の解析を行っている。さらに、小松らはずれ止めの弾性変形による床版と鋼桁の相対変位の影響をばね定数を含む剛性マトリックスで表し、不完全合成桁の解析を行っている。また、Heinsら¹³⁾は、主桁のウェブをトラスに、床版と上フランジおよび主桁の下フランジを同じ剛性を持つはり部材に置換し、橋梁全体をモデル化して解析する方法を提案している。このように、ずれの影響を考慮して全体挙動を正確に求めている研究は少ない。

本研究は橋梁構造物の劣化度を合理的に診断・評価する方法を確立するための一段階として、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の開発を試みたものである。解析方法としては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、両者を文献14)で用いた多点拘束処理の手法で結合する。このとき、不完全合成桁においては鋼桁とRC床版の間に幾分のずれが生じるが、こ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¹¹⁾で表し、不完全な合成作用も考慮できるようにした。これにより橋梁全体を平板要素として解析することができ、床版及び主桁を板要素に分割して解析する通常の方法に比べて大幅に自由度を減らすことが可能となる。必要ならばさらに床版部のみを細かく分割し解析できる。対傾構を有する場合には、はり要素と共有節点を持たないので、同じ剛性を持つトラス部材に置換する。このモデル化及び解析手法の妥当性について検討を行ったものである。

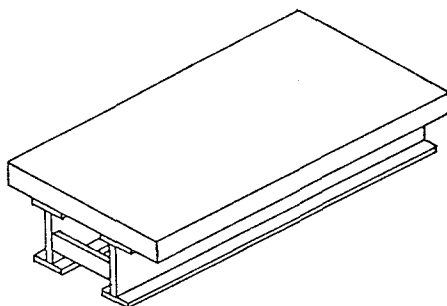


図1 合成I桁橋

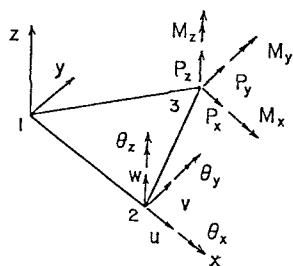


図2 板要素の節点変位と断面力

2. 解析方法とそのモデル化

図1に示すような鋼桁とRC床版及び横桁よりなる合成I桁橋を解析対象とする。RC床版部分は図2に示す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三角形板要素とする。この板要素は文献14)で用いたもので、面内回転剛性を考慮した1節点6自由度を有する。この板要素の応力-ひずみマトリックスを付録に示す。また、ここでは図3に示すような四辺形要素を用い、その四辺形要素の剛性を計算する際には三角形要素に分割した4つの剛性を平均して評価している。

$$\boxed{\text{X}} = \frac{1}{2} \left(\boxed{\text{X}} + \boxed{\text{X}} \right)$$

図3 四辺形板要素の分割

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¹⁴⁾。横桁は鋼桁の中立軸上の節点間を結んだはり要素とする。

図4はモデル化の一例を示すが、この図において、節点 i_p に接合する床版の中立面及び鋼桁の中立軸の変形状態について考える。いま、図5に示すように床版の中立面を N_p 、鋼桁の中立軸を N_b 及び節点 i_p に接合している鋼桁の節点を i_b とすると、弾性変形により節点 i_p 、 i_b がそれぞれ i_p' 、 i_b' に移動したと考える。と次式となる。

$$U_{ib} = U_{ip} + \Delta U_{ip} - h \cdot \theta_{zip} \quad (1.1)$$

$$V_{ib} = V_{ip} \quad (1.2)$$

$$\theta_{zib} = \theta_{zip} \quad (1.3)$$

$$\theta'_{xib} = (\theta_{xip+1} - \theta_{xip}) / l \quad (1.4)$$

ここに、 U_{ib} 、 V_{ib} 、 θ_{zib} 及び U_{ip} 、 V_{ip} 、 θ_{zip} はそれぞれ節点 i_b 、 i_p の x 、 y 方向変位、 z 軸まわりのたわみ角を示す。 θ'_{xib} は節点 i_b の、 θ_{xip+1} と θ_{xip} は節点 i_{p+1} 、 i_p のそれぞれ x 軸方向のねじり率及び回転角で、 l は部材軸方向の要素長である。また ΔU は節点 i_p における床版と鋼桁の間に発生するずれを、 h は N_p と N_b の距離を表わす。ずれは橋軸方向の力により発生するので、この力を X_{ip} 、これに対応するずれ止めのばね係数を k とおくと次式となる。

$$X_{ip} = k \cdot \Delta U_{ip} \quad (2)$$

式(2)の両辺を k で割り、式(1.1)に代入すると、

$$U_{ib} = U_{ip} + X_{ip} / k - h \cdot \theta_{zip} \quad (3)$$

となる。式(3)を変形し、これと式(1.2)～(1.4)より、はり要素の節点 i_p の節点変位が結合マトリックスと板要素の節点変位を用いて次式のように表される。

$$\{\delta\}_{ib} = [G_m]_{ip} \cdot \{\delta\}_{ip} \quad (4)$$

ここに、 $\{\delta\}_{ib}$ は節点 i_b の節点変位ベクトル、 $\{\delta\}_{ip}$ は図6に示すような節点 i_p を囲む4つの平面応力要素(a, b, c, d)の節点変位ベクトルと節点 i_p の平板曲げ要素の節点変位からなる節点変位ベクトルである。また、 $[G_m]_{ip}$ は結合マトリックスであり、端断面では二要素に関する 7×21 のマトリックス、他の断面は四要素に関する 7×30 のマトリックスとなる。よってずれの影響は、マトリックス $[G_m]_{ip}$ の第1行部分において、節点 i_p を囲む各平面応力要素の剛性マトリックスの x 軸方向の行ベクトル成分をばね係数 k で割った剛性を付加することで考慮している。いま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 $\{\delta_m\}$ とすると、全体の剛性マトリックスは式(5)で表される。

$$\begin{Bmatrix} \bar{F}_n \\ F_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [\bar{K}_{nn}] & [0] \\ [0] & [K_{mm}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_m \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\{\delta_m\} = [G_m] \cdot \{\delta_n\} \quad (6)$$

ここに、 $[\bar{K}_{nn}]$ 、 $[K_{mm}]$ は剛性マトリックス、 $\{\bar{F}_n\}$ 、 $\{F_m\}$

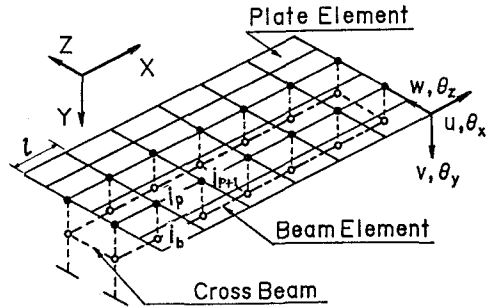


図4 モデル化

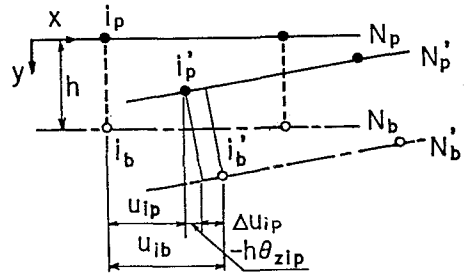


図5 床版の中立面と鋼桁の
中立軸の関係

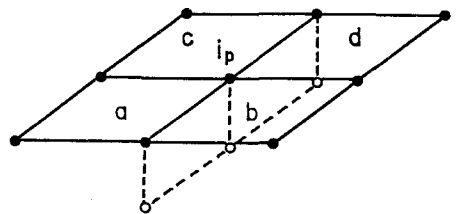


図6 平面応力要素

は外力ベクトルを表し、 $\bar{\cdot}$ は縮小により置き換えられることを意味する。また、式(4)の $[G_m]_{ip}$ をモデル全体について集成すれば式(6)となり、鋼桁の全節点変位はずれ止めのばね係数を介して床版の節点変位に置き換えられたことになる。式(5)、(6)より $\{\delta_m\}$ を消去すれば式(7)になる。

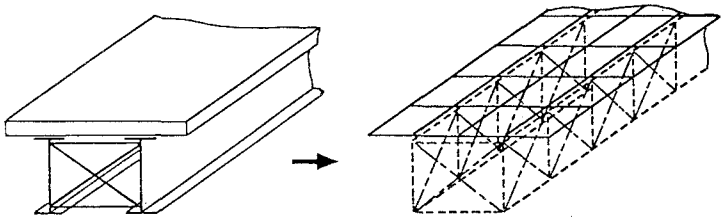
$$\{F_n\} = [K_{nn}] \cdot \{\delta_n\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここに、} \quad [K_{nn}] &= [\bar{K}_{nn}] + [G_m]^T \cdot [K_{mm}] \cdot [G_m] \\ \{F_n\} &= \{\bar{F}_n\} + [G_m]^T \cdot \{F_m\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(6)と式(8)の計算により、鋼桁の剛性マトリックスを床版の剛性マトリックスに結合マトリックスを用いて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剛性方程式が得られる。また、ずれの発生がない完全合成桁については、ずれ止めのばね係数を無限大(∞)にすればよいことになる。よってこの解析方法により、ずれの影響を考慮した合成桁の全体挙動の解析が可能となる。

図7(a)に示すような対傾構を有する一般的な橋梁構造物をモデル化する場合については、対傾構がはり要素と共有節点を持たないので、鋼桁部分の主桁・横桁・対傾構をそれぞれ図7(b)に示すような同じ剛性から成るトラス部材に置き換え、

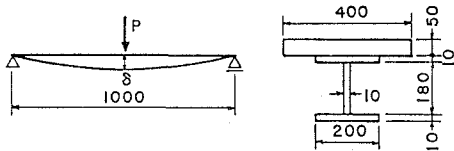
この解析方法を適用することにより解析する。このトラス部材への置換方法は、主桁などのプレートガーダーの1パネルの曲げとせん断ひずみエネルギーを、トラスの軸力によるひずみエネルギーと等置することにより、置換するトラスの各部材断面積を求める方法による。種々のプレートガーダーをトラスに置換したモデルによりその妥当性を確かめている¹⁵⁾。



(a) 合成桁

(b) 解析モデル

図7 対傾構・横桁を有する合成桁のモデル化



$$n = E_s / E_c = 7$$

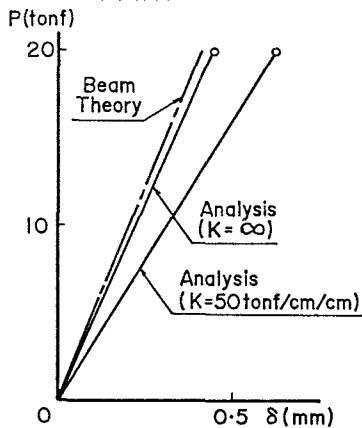
(a) 解析モデル

3. 数値解析結果と考察

本解析法の妥当性を検討するために、まず単主桁を有する合成桁の解析を行った。

図8(a)に示すような形状、寸法を持つ一本の合成桁を解析モデルとして行った。このモデルでは床版の鉄筋は考慮せず、鋼とコンクリートの弾性係数の比 n を7として完全合成桁(ずれ止めのばね係数 $k = \infty$)およびずれの影響を考慮した不完全合成桁(単位長さ当りのばね係数: $k = 50 \text{ tonf/cm/cm}$)の比較を行った。また、主桁は薄肉はり要素でモデル化している。板要素分割は橋軸方向に8、橋軸直角方向に2等分した。なお、ポアソン比 ν は0とした。

はり中央部の荷重一たわみ曲線を図8(b)に示すが、完全合成の場合この程度の分割数ではり理論値によく一致している。また、不完全合成の場合たわみが大きく、ずれの影響が表れて



(b) 荷重一たわみ関係

図8 合成桁の解析

いることがわかる。図9には $P = 20\text{tonf}$ 時の断面A ($X=3L/16$), B ($X=7L/16$, $L=100\text{cm}$)での軸方向の応力分布を示したもので、ずれがない場合にははり理論値によく一致している。また、ずれの影響は応力値が小さくて図ではその差が分かりにくい、精度良く計算できていることがわかった。

次に、大阪市土木局他¹⁶⁾が行った旧神崎橋の実験供試体についてモデル化し、载荷試験の結果と比較検討を行った。

解析モデルは図10(a)に示すように実験供試体にハンチ部分があるので合成桁全体の断面二次モーメント及び中立軸を求め、これと等しくなるように図10(b)に示す長方形の幅をほぼ同じにして、断面の板厚を求めた。なお、鋼桁寸法は実験供試体と同じにした。材料定数、ずれ止めであるジベルの単位長さ当りのばね係数 k 等は、実験で得られた値を用いており表1に示す。また、板要素分割は橋軸方向に16、橋軸直角方向に2等分とし、主鉄筋と配力鉄筋を考慮したRC床版とした。図11は、はり中央断面の载荷点での荷重-鉛直たわみの関係を示したものである。解析結果は、ずれのない完全合成桁としてのはり理論値およびずれの影響が出ている実験値に比べて両者とも多少大きく計算されているがよく一致していることがわかる。

表1 材料定数とずれ止めのばね係数

	E (kgf/cm^2)	G (kgf/cm^2)	ν	k (tf/cm/cm)
鋼桁	$2.05\text{E}+6$	$7.88\text{E}+5$	0.3	
鉄筋	$2.10\text{E}+6$	$8.08\text{E}+5$	0.3	28.9
コンクリート	$2.86\text{E}+5$	$1.19\text{E}+5$	0.2	

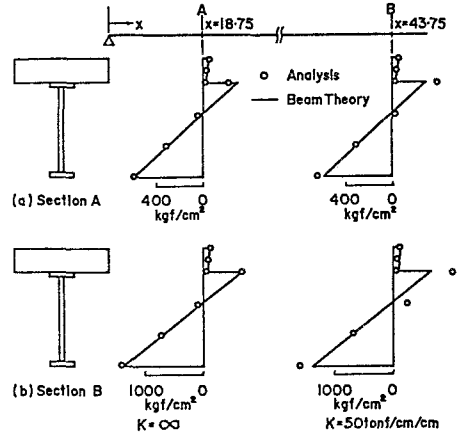


図9 軸応力分布図($P = 20\text{tonf}$)

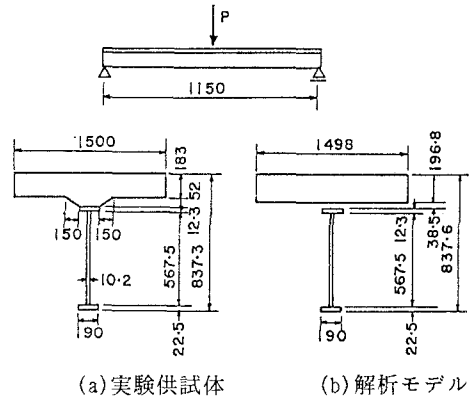


図10 旧神崎橋の供試体(単主桁)

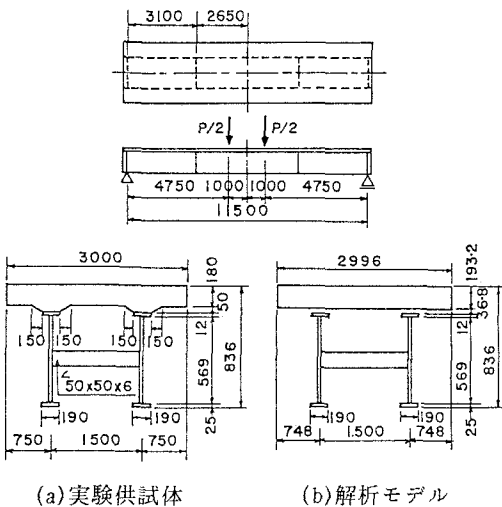


図12 旧神崎橋の供試体(2主桁)

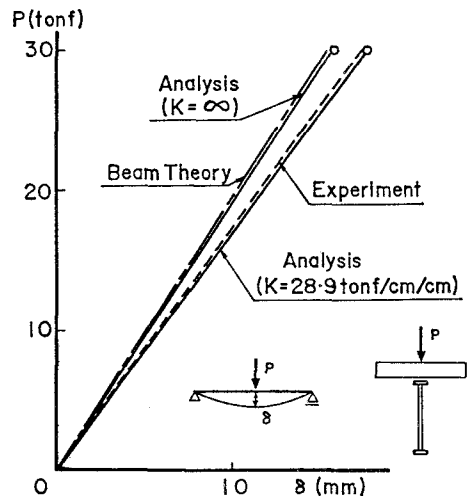


図11 荷重-たわみ関係(支間中央断面)

図12は2主桁を有する実験供試体について単主桁の場合と同様にモデル化したものを示す。材料定数等も単主桁と同じものである。横桁はL形を同じ剛性を持つH形に換算したはり要素とした。要素分割は橋軸方向に16、橋軸直角方向に4等分とし、荷重は図12に示すような実験と同じ2点載荷とした。図13は床版の支間中央に載荷した場合の中央断面L点の鉛直たわみを示す。ずれの影響を考慮した解析値は実験値によく一致していることがわかる。ずれがない場合解析結果も併せて示してあるが、ずれの影響がかなり大きいことがわかる。また、図14は床版の非載荷桁への分配効果を調べるために、2主桁中の1主桁に偏心載荷した場合の中央断面のたわみ分布を示したものである。実験結果より弾性状態と考えられる $P=20$ tonfにおいて実験値と比較した。解析値は実験値と同様に載荷桁側の床版端部のたわみが大きく、非載荷桁に向かうほどたわみが小さく計算されており、非常によい対応を示していることがわかる。

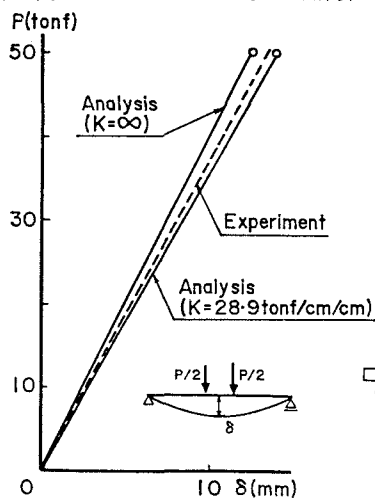


図13 支間中央断面L点の荷重—たわみ関係

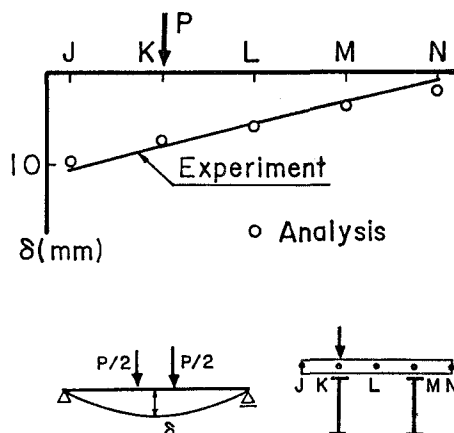


図14 支間中央断面のたわみ分布
($P=20$ tonf)

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手法を提案した。そして実橋より取り出した合成I桁橋の実験供試体に適用して、この解析方法の妥当性を検討した。

この解析法を用いれば、橋梁全体を平板要素として解析することができ、床版及び主桁を板要素に分割して解析する通常の方法に比べて大幅に自由度を減らすことが可能となり、比較的容易に全体挙動を解析することがわかった。また、ずれ止めによる弾性変形の影響もうまく考慮できており、合成I桁橋問題に対する本法の妥当性が確認された。しかし、ここでは解析手法の提示と主桁部分をはり要素で置換した場合のわずかな数値計算例しか述べることができなかったが、今後は対傾構を有する場合を含めて一般の多主桁の合成桁に適用して実験結果や実橋の実測結果との比較検討を行って本法の有効性を検討し、さらに合成桁の全体挙動を調べていく予定である。

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福井学氏（現 大成建設㈱）およびロー・コー・チュン氏にご協力を得た。ここに記して謝意を表します。また、本論文の計算はすべて熊本大学情報処理センターのFACOM M-360を使用した。

付録：RC床版の応力－ひずみマトリックス

RC床版は主鉄筋量と配力鉄筋量が異なるので直交異性板として取り扱う必要がある。そこで、ここでは平面応力要素は、鉄筋による剛度の増加のみを考慮した等方性板とし、平板曲げ要素は直交異方性板として次の応力－ひずみマトリックスを用いた¹⁷⁾。

平面応力要素： D_m

$$D_m = B \begin{bmatrix} 1 & \nu_c & 0 \\ \nu_c & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu_c)/2 \end{bmatrix}$$

ただし、

$$B = \frac{E_c}{1-\nu_c^2} \left\{ t + \frac{1}{2} (n-1) (A_s + A_d) \right\}$$

$$n = E_s / E_c$$

t : 床版の板厚

ν_c : コンクリートのポアソン比

E_c, E_s : コンクリート及び鋼材の弾性係数

A_s, A_d : 単位幅当りの主鉄筋と配力鉄筋量

平板曲げ要素： D_b

$$D_b = \begin{bmatrix} D_x & D_1 & 0 \\ D_1 & D_z & 0 \\ 0 & 0 & D_{xz} \end{bmatrix}$$

ただし、

$$D_x = \{ I_c + (n-1) I_{sx} \} E_c / (1-\nu_c^2)$$

$$D_z = \{ I_c + (n-1) I_{sz} \} E_c / (1-\nu_c^2)$$

$$D_1 = \nu_c \sqrt{D_x \cdot D_z}$$

$$D_{xz} = (1-\nu_c) \sqrt{D_x \cdot D_z} / 2$$

$$I_c = t^3 / 12$$

I_{sx}, I_{sz} : 中立軸に関する主鉄筋及び配力鉄筋の単位幅当りの断面二次モーメント

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／I-5，pp.1-12，1986-4.
- 2) 橋梁と基礎：補修・補強特集号，建設図書，Vol.17，No.8，1983.8.
- 3) 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.
- 4) 西村 昭・藤井 学・宮本文穂・加賀山泰一：橋梁の損傷評価における力学的挙動の有効性，土木学会論文集，第380号／I-7，pp.355-364，1987.4.

- 5) 奥村敏恵・佐藤政勝：有限要素法によるスタッドジベルを用いた合成桁の弾塑性解析，東京大学工学部附属総合試験所年報，第32巻，pp.59-68，1973.
- 6) 尾下里治・金子俊一：直線・曲線および斜角の合成 I 桁橋の立体解析，土木学会論文集，第374号／I-6，pp.339-348，1986.10.
- 7) 増田陳紀・西脇威夫・皆川勝・街道 浩：合成 I 桁橋の対傾構部材力の簡易解析手法，構造工学論文集，Vol.34A，pp.385-393，1988.3.
- 8) 浜田純夫・有住康則：不完全合成桁の有限要素解析，土木学会論文報告集，No. 265，pp.1-9，1977. 9.
- 9) Gustofson, W.C. and Wright, R.N. : Analysis of Skewed Composite Girder Bridges, Proc. of ASCE, Vol.94, ST4, pp.919-941, 1968.4.
- 10) Moffatt, K.R. and Lim, P.T.K. : Finite Element Analysis of Composite Box Girder Bridges having Complete or Incomplete Interaction, Proc. of ICE, Part 2, pp.1-22, 1976.3.
- 11) 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.
- 12) 吉田 裕・雨宮栄一郎・増田陳紀：立体構造解析のための薄板有限要素，土木学会論文報告集，第211号，pp.19-28，1973.3.
- 13) Heins, C.P. and Kato, H. : Lateral Wind Bracing Requirements for Steel Composite Bridges, AISC Engineering Journal, Vol.19, No.3, 1982. (和訳，原田康夫：鋼合成桁橋に対する横構の必要性，JSSC, Vol.201, No.213, 1984.5.)
- 14) 山尾敏孝・嶋元達郎：板要素とはり要素の結合による薄肉鋼構造物の有限変位弾塑性解析，構造工学論文集，Vol.32A，pp.291-302，1986.3
- 15) 椎原賢次・嶋元達郎・山尾敏孝・川井 豊：トラス置換によるクレーン・ガーダーの解析，土木学会第43回年次学術講演会，I-32，1988.10.
- 16) 大阪市土木局他：旧神崎橋の耐荷力に関する研究報告書，1983.3.
- 17) 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.

(1988年10月12日 受付)