

斜角を有する鋼箱桁の支点反力分配

Reaction Allotment of Skew Steel Box Girders

金原 慎一*
Shin-ichi KINBARA

Summary

To design support diaphragms the magnitude of reaction on the support must be known. This paper considers such reaction forces on the support of skew box girders. When a skew box girders has two shoes in the section of its support, these two shoes are subjected to reaction forces which are generally different. In this paper, the reaction forces at such shoes are numerically analyzed by the finite element method, and the result of them (the allotment of reaction forces by FEM) are compared with those of in-plane grid analysis.

1. はじめに

一般に、箱桁橋では支点上ダイアフラムを介して主桁のウェブ、フランジに反力を伝達させる構造となっている。支点上ダイアフラムには大きな外力としての支点反力が作用し、その崩壊が橋梁全体の崩壊にも及ぶほどの重要な部材である。

事実、過去にその崩壊によって架設途中の箱桁が落橋した事例が海外にあること、また我が国においては、その設計方法が確立されていないことから支点上ダイアフラムに関して、その応力分布や耐荷力に対する研究がなされてきている。

まず、清水らは文献3)に示された手法を連続直線箱桁の中間支点上ダイアフラムに応用して、その応力分布を調べている⁴⁾。また、清水らは曲線箱桁において、中間ダイアフラムの間隔によって左右の反力バランスが異なること、直線桁の場合と同様に支点反力を精度よく求めることによって支点上ダイアフラムの応力が文献12)に示される簡易式によって容易に推定できること⁶⁾、などから文献4)の手法によって、1箱桁2沓の曲線連続箱桁の中間支点における反力分配係数と主桁断面形状、曲率の関係を解析している⁵⁾。また、著者らは斜角を有する箱桁の支点上ダイアフラムの応力性状について報告している⁶⁾。

依田らは偏心荷重の作用する箱桁のFEM解析結果から支点上ダイアフラムの必要剛度並びにこれに共同する

主桁フランジの有効幅について報告している⁷⁾。

一方、支点上ダイアフラムの座屈・耐荷力に関して、福本らは実橋を目的とした供試体によるひずみ測定ならびに耐荷力実験を行い、文献4)の方法による解析結果、文献12)の簡易計算式との比較検討を行っている⁸⁾。また、堂垣らは補剛材が取り付けられてない無補剛の支点上ダイアフラムに対する弾性座屈解析を行っている⁹⁾。筆者らも連続曲線箱桁の支点上ダイアフラムの応力解析を行い、その弾性座屈解析を行った¹⁰⁾。一方、清水は文献4、8)の研究結果を基にして支点上ダイアフラムの境界条件、作用荷重を定め、大変形解析によってその崩壊荷重の解析を行っている¹¹⁾。

しかし、これらの研究の多くは支点上ダイアフラムそのものに着目したもので、FEM等による全体解析による結果を報告したものや、外力としての支点反力が既知であると仮定した上での報告であり、設計断面力としての反力に着目した研究は非常に少ない。

一方、最近では、用地問題などから複雑な道路線形が採用されるようになり、橋梁区間の線形もまた単純なものばかりではなくなってきている。また、コンピュータの発展、設計・製作・架設技術の向上などから、直線直橋にこだわらず、曲線橋、斜橋が多く計画されてきている。周知のように斜橋では、均等な鉛直荷重が作用してもその斜角によって、主桁にねじり、そり等の変形が生じ、反力分配も異なってくる。

* 技術本部先行技術研究室係長

ダイアフラムや支承の設計に用いる断面力としての反力をFEMなど高級解析によって求めることは実用上困難であるため、1箱桁2沓の箱桁においては、図-1に示すような格子モデルを用いている。しかし、このような不静定構造物の解析モデルでは主桁はもちろん横桁の剛性をどう評価するかによって、1支承線での反力分配が異なってくる。

斜橋や曲線橋において、支点反力を精度良く求めることは、曲げモーメントなど主桁そのものの設計断面力の解析精度をも向上させることを意味し、また、過去における支点上ダイアフラムに関する研究成果を生かすことができる。

本報告は、このような斜角を有する箱桁に着目し、有限要素法と格子解析によって、支点反力の傾向を調べようとしたものである。FEM解析には1要素4節点の四辺形厚肉線形シェル要素を用いた。

2. 数値解析モデル

本論文で用いたFEM解析モデルを図-2に示す。主桁形式は、実際の橋梁にもよく用いられ、また、形状がシンプルな矩形断面、1箱桁2沓の単純桁橋を想定した。主桁支間は実橋でも計画されるサイズとして15m、桁高は、ディープビームにならない範囲として支間の1/10以下となるように1.2mとした。断面形状については2沓形式として採用頻度が高いと考えられる $B/H=1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0$ の5種類とした。また、中間ダイアフラムは5mおきに充実率100%のものを設置し、その中間に横リブに相当する矩形孔を設けたものを配置した。斜角 θ については、一般の橋梁計画の上で採用される値として $\theta=60^\circ$ とした。支点上補剛材の断面は高さを100mm、板厚を19mmとして、図-2(c)のダイアフラム断面図に示すように主桁ウェブより内側に $B/12$ の位置に配置した。なお、荷重は図-2(b)に示すように、主桁ウェブに対して等分布に載荷した。支点条件は、ピボット支承を想定して全方向の回転を自由とした。

一方、支点の周囲 $(B/12) \times 200\text{mm}$ の範囲の要素は支承の上沓に接する比較的剛な部分であると考え、その板厚をフランジ厚の5倍に増厚した。なお、解析モデルにおける箱桁の板厚構成を表-1に示す。Aシリーズを基本として、フランジ、ウェブ、ダイアフラムの板厚を各々約2倍程度に増厚したF、W、Dシリーズのモデルも解析し、反力に対する板厚の影響も調べた。以降、本報告で

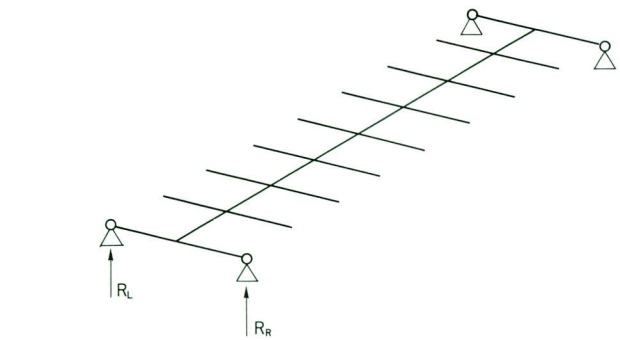
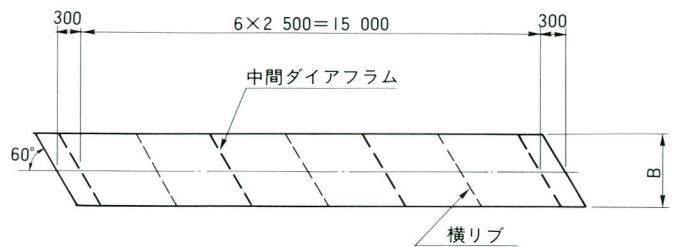
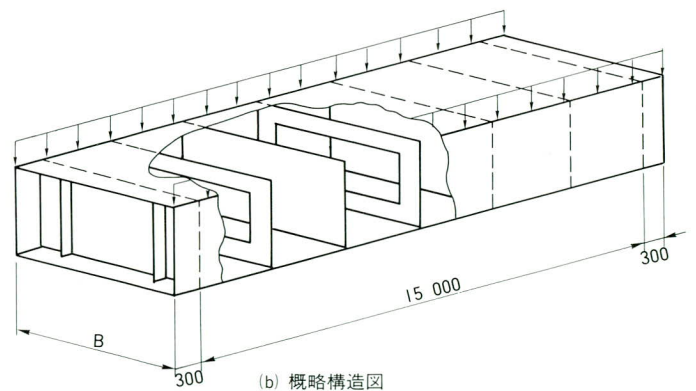


図-1 格子解析モデル



(a) 平面図



(b) 概略構造図

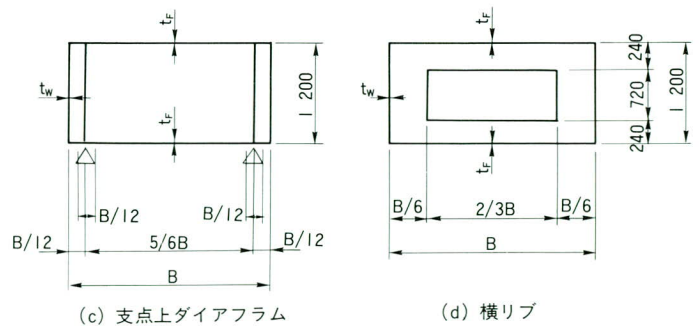


図-2 FEM解析モデル

表-1 FEM解析モデルの板厚構成

解析モデル	フランジ厚 tf (mm)	ウェブ厚 tw (mm)	支点上 ダイアフラム tsd (mm)	中間 ダイアフラム tmd (mm)
Aシリーズ	12	9	16	12
Dシリーズ	12	9	32	12
Fシリーズ	25	9	16	12
Wシリーズ	12	22	16	12

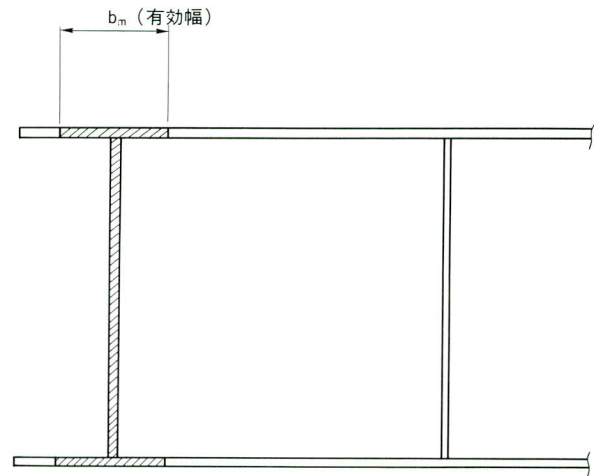


図-3 格子解析に用いるダイアフラム断面

はこの表に示す名称で解析モデルを表現することとし、上記記号の後に主桁ウェブ間隔を付し、A180等と表示する。

一方、FEM解析結果との比較対象となる平面格子解析では部材のせん断変形を考慮したものとそうでないものの両方の結果を算出した。せん断変形を考慮した梁の剛性マトリクスについては、広く知れ渡っており、目新しいものではないが、念のため以下に記しておく。

$$K = \frac{EI}{L^3(1+\phi)} \begin{pmatrix} 12 & & & \\ 6L & (4+\phi)L^2 & & \text{Symm.} \\ -12 & -6L & 12 & \\ 6L & (2-\phi)L^2 & -6L & (4+\phi)L^2 \end{pmatrix} \quad (1\cdot a)$$

ここに、 $\phi = 12EI / GAsL^2$ であり、 As は $\alpha \times$ (断面積)であらわされるせん断有効断面積で係数 α は次式で表される。

(I断面の場合)

$$\alpha = \frac{15.3 + 91.8k + 190.5k^2 + 108k^3 + n^2(42k + 43.5k^2)}{13(1+3k)^2} \quad (1\cdot b)$$

$$k = \frac{2 \cdot b \cdot t_F}{h \cdot t_w} \quad n = \frac{b}{h}$$

(箱断面の場合)

$$\alpha = \frac{15.3 + 91.8k + 190.5k^2 + 108k^3 + n^2(33k + 30k^2)}{13(1+3k)^2} \quad (1\cdot c)$$

$$k = \frac{b \cdot t_F}{h \cdot t_w} \quad n = \frac{b}{h}$$

t_F : フランジの板厚

t_w : ウェブの板厚

b : フランジ幅

h : ウェブ高さ

もちろん、せん断変形を考慮しない場合、すなわちせん断剛性が無限大になる場合は、上記剛性マトリクスにおいて $\phi = 0$ となり、一般の梁の剛性マトリクスに一致する。

本報告では、格子解析における横桁要素(ダイアフラム)の曲げ剛性は図-3に示すようなI断面の梁として計算した。また、せん断剛性はダイアフラムのみをせん断抵抗断面積(フランジ断面積は考慮しない)としたものと、フランジを含めI断面全てを有効断面積としたものの2種類考慮した。また、せん断変形の影響を調べるため、通常設計で行われている曲げ変形のみを考慮したモデルについても解析を行った。

3. 反力比

図-4はA120、A240、A480について、FEM解析結果と格子解析結果の両方をプロットしたものである。図は反力比 $R_L / (R_L + R_R)$ を縦軸、横桁と主桁の剛比 K_F / K_G を横軸にとって表したものである。ここに、 K_F 、 K_G は、横桁、主桁の剛度であって、それぞれの断面2次モーメントをその支間長で除したものである。また、 R_L 、 R_R はそれぞれ鋭角側、鈍角側の支点反力を表している。

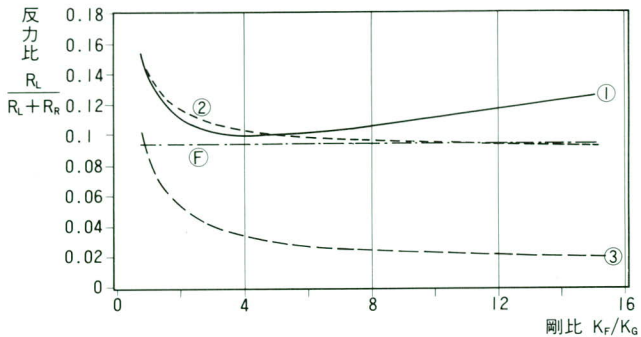


図-4 (a) A 120モデルの反力比

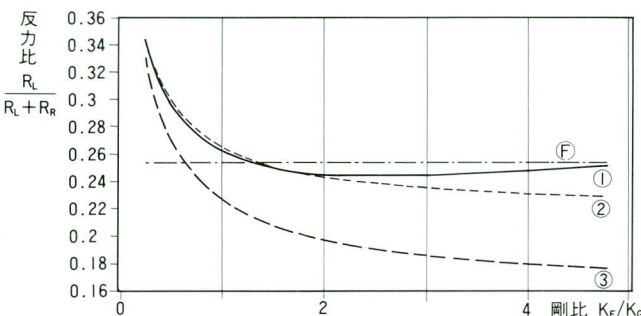


図-4 (b) A 240モデルの反力比

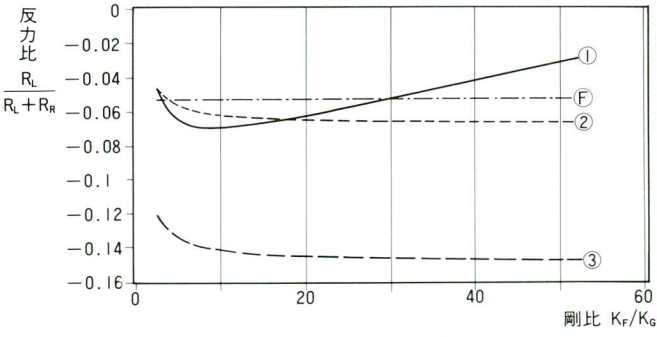


図-4 (c) A 480モデルの反力比

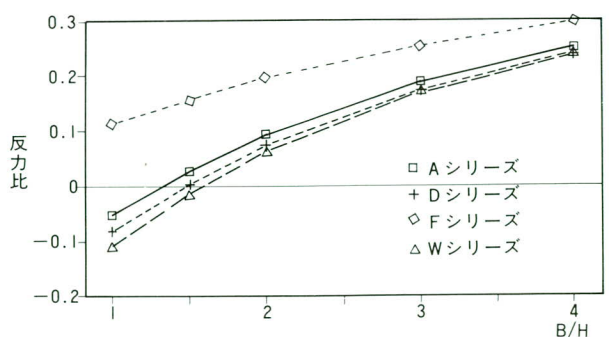


図-5 ウェブ間隔と反力比の関係

上記の定義から、反力比が0.5の場合 $R_L = R_R$ となり、これが0.5を下回れば $R_L < R_R$ となり、0を下回ると鋭角側に負反力が生じていることになる。なお、この格子解析に用いた主桁の断面2次モーメント、ねじり定数はFEM解析モデルの断面寸法から算出したものである。なお、主桁の断面2次モーメントには道示¹⁾8.3.4式(8.3.1)によって算出した有効幅を考慮してある。

一方、横桁の断面2次モーメントは、ダイアフラムに協力する主桁上下フランジの幅を変化させることによって求めており、その有効範囲を0～5mとした。図中にプロットした各曲線に付した、①②③Fの記号ははそれぞれ以下の通りである。

- ①せん断抵抗断面積にフランジとダイアフラムを考慮したもの
- ②せん断抵抗断面積にダイアフラムの断面のみを考慮したもの
- ③せん断変形を考慮しないもの
- F FEM解析による反力比（フランジの有効幅等が不明なため横軸に平行な直線で表した。）

格子解析結果の中で、②せん断有効断面積にダイアフラムのみを考慮した(せん断有効断面積が一定値となる)ケース、および、③曲げ変形のみを考慮したケースでは、剛比が増加すると、反力比は、はじめは急速に減少し、その後は次第に一定値に収束する傾向がある。すなわち、剛比がある程度大きくなれば、曲げ変形項は反力比に対しそれ以上の影響を与えないことになる。一方、断面2次モーメントの増加とともにせん断抵抗断面積が増加する①のケースでは、剛比がまだ小さい範囲においては、反力比が②のケースより急激に減少し、極小値を持つ。そして、剛比がさらに大きくなると、反力比は徐々に増加し、最終的には直線的に増加する。これは、反力比に対するせん断変形の影響が、有効断面積の増加にほぼ比例して増加する傾向にあることを示している。

また、通常的设计で行われているように、格子解析においてせん断変形を考慮しない場合、FEM解析結果に比べて反力比が小さくなる、すなわち、同一支承線上での反力値の差が大きくなる傾向にある。一方、せん断変形を考慮することによってFEM解析結果と格子解析結果はほぼ一致し、精度の良い結果が得られることがわかる。これは、格子解析において曲げ変形のみを考慮することが、支間の小さなダイアフラムの剛性を相対的に大きく評価していることになる。

図-5はFEM解析による反力比を縦軸に、主桁の断

表-2 ダイアフラムに協力するフランジ有効幅を考慮して算出した反力比

解析モデル	B/H	FEM解析	格子解析	誤差 (%)
Aシリーズ	1.00	-0.052878	-0.069540	31.5
	1.50	0.027457	0.031046	13.1
	2.00	0.093840	0.102365	9.1
	3.00	0.189271	0.196003	3.6
	4.00	0.253240	0.253026	-0.1
Fシリーズ	1.00	0.110918	0.100957	-9.0
	1.50	0.156800	0.160539	2.4
	2.00	0.196100	0.203062	3.6
	3.00	0.256575	0.262587	2.3
	4.00	0.300643	0.300646	0.0

面比B/Hを横軸にとってその関係をプロットしたものである。反力比はB/Hが大きくなる、すなわち、断面が扁平になるにしたがって大きくなっていくことがわかる。また、ダイアフラムを増厚したDシリーズモデル並びにウェブを増厚したWシリーズモデルではAシリーズに比べて反力比が小さくなる傾向にある。ただし、その変動は非常に小さなものである。一方、フランジを増厚したFシリーズモデルでは、Aシリーズに比較して反力比が大きくなる傾向にありその変動も他のシリーズに比べて大きい。これら主桁を構成する板厚変動の反力比に対する影響はウェブ間隔の小さな解析モデルに大きく現れる傾向にある。

以上のように、斜角を有する箱桁の反力はダイアフラムをモデル化した横桁要素の剛性に影響される。また、図-3でもわかるように、ダイアフラムに協力するフランジのせん断変形をも考慮すると、有効幅を増加させることによって、一度減少した反力比が再び増加する傾向もある。従って、格子解析を行うにあたって、ダイアフラムに協力するフランジ有効幅を知ることは重要なことである。主桁に直角方向に配置されるダイアフラムに協力するフランジ有効幅に関しては、中井らの研究¹³⁾があり、次式が提示されている。

$$bm = \frac{2\ell}{\pi(1+\nu) \cdot (3-\nu)} \quad (2)$$

ここに、 ν : ポアソン比

ℓ : ウェブ間隔 (箱幅)

表-2はA、Fシリーズについて、上式で求めた有効

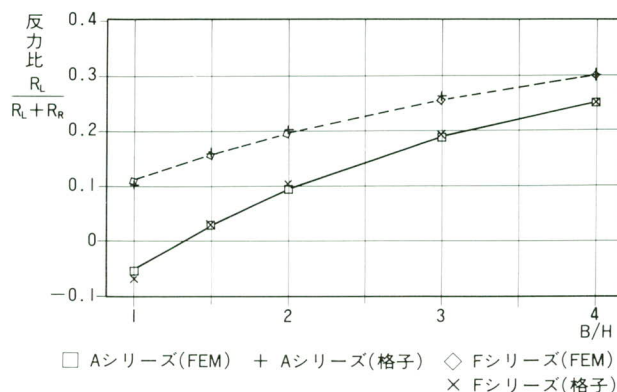


図-6 FEM解析と格子解析の比較

幅を用いた格子解析結果とFEM解析結果を比較したものである。なお、上式を用いるにあたり、 $\nu=0.3$ とし、 ℓ は横桁要素の支間(支承間隔)とした。この結果、基本としたAシリーズではウェブ間隔の小さなモデルでは誤差が大きいものの、Fシリーズも含めて非常に良い近似を与えていることがわかる。また、図-6にこの結果をプロットしているが、箱幅の小さい解析モデルで誤差が大きいとはいうものの、値が0に近い割合として大きな値を示すだけで現状は充分実用的な精度であることがわかる。

4. 考察

以上、斜角を有する箱桁の反力比とダイアフラムに相当する横桁要素の剛性評価について述べてきた。本報告での解析は限られたものではあるが、結果をまとめると以下ようになる。

- ①設計技術者が箱桁を設計する際の格子解析において、ダイアフラムは剛体として取り扱われている。実際の解析では剛体を取り扱うことは困難であるため、ダイアフラムに相当する横桁要素の断面2次モーメントを主桁要素の50~100倍程度の値を用いている。また、解析モデルのせん断変形は考慮されていない。このような解析では、左右の反力比小さくなる、すなわち、反力差が大きくなることから、構造物を安全側に評価していることになる。しかし、このような解析によって、数値計算上、大きな常時負反力が生じその対応に苦慮することがある。本研究のように、せん断変形を考慮

することにより、実用的に良い精度で反力を求めることが可能で、また、構造物の安全性を損なうことなく負反力等も多少軽減される結果を得ることができる。

- ②箱桁の構成要素の中で、反力比に対するフランジ厚の影響が非常に大きい。また、フランジを厚くすることで反力比が大きくなる、すなわち、反力バランスが向上する傾向がみられる。今後、さらに解析等で研究を進める必要はあるが、非常に大きな負反力が生じ、その対応に苦慮するような場合、負反力対策のひとつとして、フランジを増厚することも有効な方法ではないかと考えられる。

5. おわりに

この研究では、箱桁橋の設計に用いられる格子解析モデルにせん断変形を考慮することによって、その値がFEM解析結果とよく合うことを報告した。また、支点上ダイアフラムに協力する主桁フランジの有効幅も文献¹³⁾に示された算出式によって充分実用的な精度を得ることがわかった。従って、支点上ダイアフラムの応力評価をする場合には、せん断変形を考慮した格子解析は有効な手段であり、また、主桁設計用の断面力等の精度向上にも有効な手法と推察される。ただし、支承直上等に降伏域が生ずるような支点上ダイアフラムの耐荷力を考えた場合、応力の再配分の影響によって、反力比が変動することも予想され、引き続き研究を進めたい。

なお、本研究のFEM解析は当社所有のMARC、バージョンK4-2によった。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、1990
- 2) 日本道路協会：鋼道路橋設計便覧、1980
- 3) 大塚久哲、吉村虎蔵、彦坂 熙、藤津卓司：有限帯板法による中間隔壁をもつ曲線箱桁橋の解析、九大工学集報、49.2、pp.67-74、1976.2
- 4) 清水 茂、梶田建夫、成岡昌夫：連続箱桁における中間支承部の応力状態について、土木学会論文報告集、第276号、pp.13-22、1978.5
- 5) SHIMIZU, S., YOSHIDA, S. : Reaction Allotment of Continuous Curved Box Girders, Thin walled Structures, Vol. 11, pp. 319-341, 1991
- 6) 金原慎一、清水 茂：斜角を有する鋼箱桁の支点上ダイアフラムの応力性状、構造工学論文集、Vol. 39 A, 1993.3
- 7) 依田照彦、平嶋政治、中田 隆、神田恭太郎：支点上ダイアフラムの簡易設計法について、土木学会第42回年次学術講演会概要集 pp. 440-441、1987.9
- 8) 福本嘯士、清水 茂、古田博秀：鋼箱桁支点上ダイアフラムの強度に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第318号 pp. 149-161、1982.2
- 9) DOGAKI, M., HARADA, M. and YONEZAWA, H.: Elastic Buckling of Support Diaphragms with Rectangular Holes in Steel Box Gieders, Tehnical Report of Kansai University. No. 27, pp. 73-185, 1986
- 10) 金原慎一、清水 茂、吉田俊彌：連続箱桁の中間支奉上ダイアフラムの座屈強度評価に関する一考察、土木学会第35回年次学術講演会要集、pp. 291-292、1980.9
- 11) 清水 茂：鋼箱桁支点上ダイアフラムの大変形解析、土木学会第47回年次学術講演会概要集、1992.9
- 12) The Committee of Inquiry into the Basis of Design and Method of Erection of Steel Box Girder Bridges : Interim Design and Workmanship Rules, Her Majesty Stationary Office, London, 1973
- 13) 中井 博、田井戸米好、林 秀侃：偏平多室箱桁のシアラグ解析と有効幅の一算定法、土木学会論文報告集、第340号、1983年12月