

(9) 曲線合成箱桁の実験的研究

山口大学工学部 ○浜田 純夫、日野 伸一
 琉球大学工学部 有住 康則、大城 武
 岡崎工業 川副 静城、正久 良平

1. まえがき

曲線桁は都市内高速道路あるいはランプウェイに広く用いられるようになり、我国では、合成箱桁も用いられるようになってきている。米国における60m以下の曲線箱桁はほとんど合成箱桁であり¹⁾、AASHTO示方書においては、鋼箱桁と合成箱桁の区別は明確でない。ランプウェイにおける曲線桁は、ループ橋にもなり、曲率半径は極めて小さくなる。このような曲率半径の小さい曲線桁では曲げによる応力の他、断面変形による応力も含めなければならない。曲線箱桁の研究のほとんどは、この断面変形による応力と、ダイヤフラムの効果に関するものである。これらの研究には、薄肉断面はり理論²⁾³⁾、折れ板理論⁴⁾、BEF理論⁵⁾、ビームアナロジー⁶⁾、有限要素法⁷⁾、有限帯板法⁸⁾、ブロック有限要素法⁹⁾などを用いている。同時に Heinsら¹⁰⁾、坂井ら⁸⁾、および中井ら¹¹⁾ は中間ダイヤフラムの設計に対する提案を行っている。

曲線箱桁の実験も、我国では鋼断面の実験として小松、中井¹²⁾¹³⁾らが、またアクリル樹脂等を用いている実験¹⁾¹⁴⁾もある。

このように曲線箱桁の理論的および実験的解析は行われているにもかかわらず、合成断面をもつ箱桁の実験的研究は極めて少ない。わずかに、Heins が実験室で3本の直合成箱桁の実験¹⁵⁾を行い、曲線合成箱桁の実験を実物の橋梁¹⁶⁾で行っている。

本研究ではこのような見地から、従来ほとんど行われてない曲線合成桁の実験データを与えるために3本の実験供試体を作り、載荷実験を行った。既に弾性域の範囲については報告¹⁷⁾したが、ここでは終局耐力までの報告をする。また、従来の曲線鋼箱桁の実験では必ずしも断面の応力分布の検証が十分とはいえない。さらに、合成断面の特徴を調べるために断面応力分布とジベルのずれに注目して測定データを得た。本研究では断面の変形による応力に注目するため、ダイヤフラムは端のみで、中間には配置しなかった。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

本実験は3つのモデルを用いた。そのパラメーターは曲率半径と鋼断面（開断面と閉断面）である。表-1にこれらパラメータおよび断面諸量を示す。また断面寸法を図-1に示す。断面諸量はコンクリートに対する弾性係数比 n を7として計算されたものである。ねじり定数 $\kappa = Q\sqrt{GK/ET_w}$ は、全て30以上であり、道路橋示方書第Ⅱ編で判定すれば、ねじりによるそり応力が無視できることになる。鋼材はSS41である。

鋼桁の両支点上にはダイヤフ

表-1 桁のパラメータ及び断面諸量

ラムを配置しているが、中間には配置していない。これはゆがみによる応力に特に注目しているからである。鋼断面ウェブの幅厚比 b/t は58で、水平補剛材

	Q (cm)	R (cm)	α (度)	ねじり定数比 κ
C-1	418.9	800	30	43
C-2		400	60	43
C-3		800	30	41

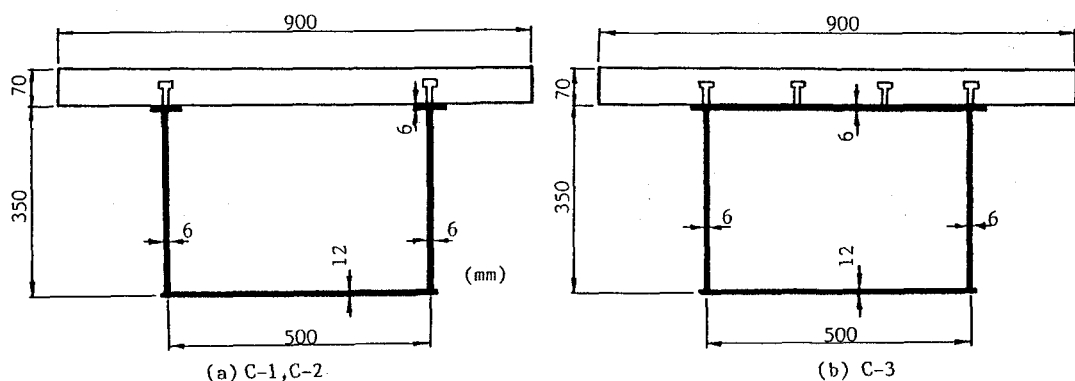


図-1 断面寸法

表-2 コンクリートの配合

の不要な厚さである。コンク

リートスラブは、幅90cm、厚さ7cmであり、桁軸方向にD10(SD30)の鉄筋が6本、半径方向に直径10mmの鉄筋が23本配置されている。コンクリ

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ (cm)
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
4.8	162	338	854	1000	0.845	6.4

ートの配合を表-2に示す。圧縮強度は308kg/cm²、弾性係数は $E_c = 2.71 \times 10^5$ kg/cm²であった。破壊試験時における材令は1年を越えている。(弾性域における桁の載荷試験は材令約2ヶ月であった。)ずれ止めはスラブ厚7cmであるために、直径13mmのものを用了。ずれ止めの配置は開断面においてはウェブ直上に、閉断面においてはウェブ直上だけでなく、フランジの2列にも配置した。ジベル本数は52および56本であるが、直桁に換算し、塑性耐力から算出したものである。本実験では、図-2に示すように支点上に負の反力が生じないように剛性の大きい支持桁を用い、供試体をこの支持桁に固定した。供試体の支点上はダイヤフラムとブラケットを配置し、端において断面変形が生じないようにした。この支持桁端には桁軸方向に可動ヒンジとした。このため、この桁の境界条件は曲げに対し単純支持で、ねじりに対し固定となる。ただし、そりに対しては確かではない。

2.2 たわみおよびひずみの測定

図-3にたわみ変形およびひずみの測定位置を示す。たわみおよび断面の変形はスパン中央で測定した。軸方向ひずみは、スパン中央から30cmの位置とスパン1/4点、せん断ひずみはこれら2点のほか支点から30cmの位置の3点

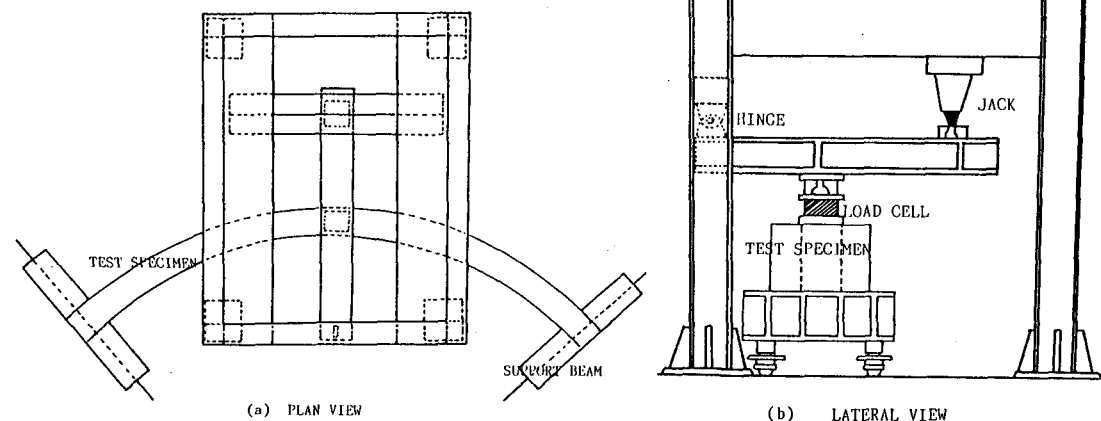
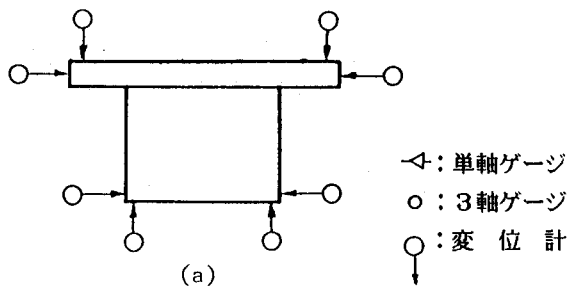


図-2 載荷装置



で測定した。軸方向ひずみは単軸ゲージ、せん断ひずみは 3軸ゲージを用いて測定した。軸方向ひずみは断面全体にわたって測定したが、せん断ひずみは主として腹板とした。

3. 実験および計算結果と考察

3.1 理論値

曲線桁に対し、種々の理論が提案されている。主なものは前述のようにはり理論である。ここではシェル要素を用いた有限要素法を用いることにする。要素分割はスパン方向に 6、上フランジ 4、ウェブ 3、下フランジ 4 とし、84要素とした。この要素は必ずしも十分なものとは考えられないが、計算機容量によるものである。終局耐力、有限変形および弾塑性解析は行っていない。

3.2 終局耐力

鋼曲線箱桁および合成箱桁に対する耐力実験はほとんど行われていない。本実験における終局耐力は表-3に示されている。一方、微小変形理論に基づく有限要素解析によるスパン中央の軸方向ひずみおよび端のせん断ひずみの初期降伏荷重も同表に示されている。この桁が降伏後に破壊したことは前述の荷重-ひずみ曲線からも判明し、この計算値からは端部がまず降伏し、スパン中央が降伏したことになる。桁 C-2は端部せん断ひずみの降伏と同時に破壊したことになる。桁 C-3は鋼桁が閉断面となっているためもあり、圧壊するコンクリートに負担が小さかったものと考えられる。このため桁 C-1よりかなり大きい実験値を示している。今後、曲線箱桁における終局耐力にはせん断降伏を含め十分注意が必要である。

なお、実験における破壊モードはコンクリートの圧壊であり、破壊前には鋼板の屈服は生じていない。

3.3 たわみ

図-4に各桁の下フランジ2点(内側と外側)の平均たわみを示す。図から判明できるように、桁 C-1、C-2、C-3におけるたわみの変化点、つまり勾配が徐々に大き

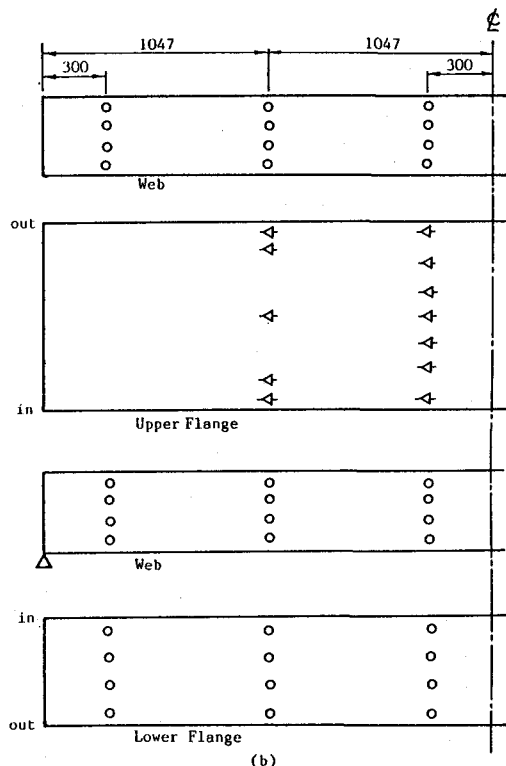


図-3 たわみ及びひずみの測定位置

表-3 終局荷重

	実験値	理論値	
		スパン中央降伏	端部降伏
C-1	43.0	51.8	27.7
C-2	23.5	38.1	23.1
C-3	51.0	52.5	30.8

$$\begin{aligned} \text{スパン中央 } \varepsilon_y &= 1200 \times 10^{-6} \\ \text{端部 } \gamma_y &= 693 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

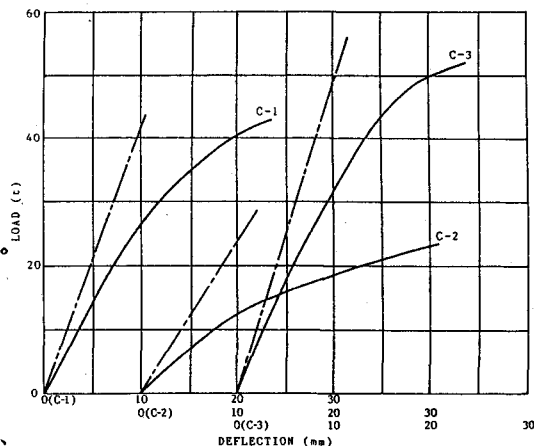


図-4 荷重-たわみ関係

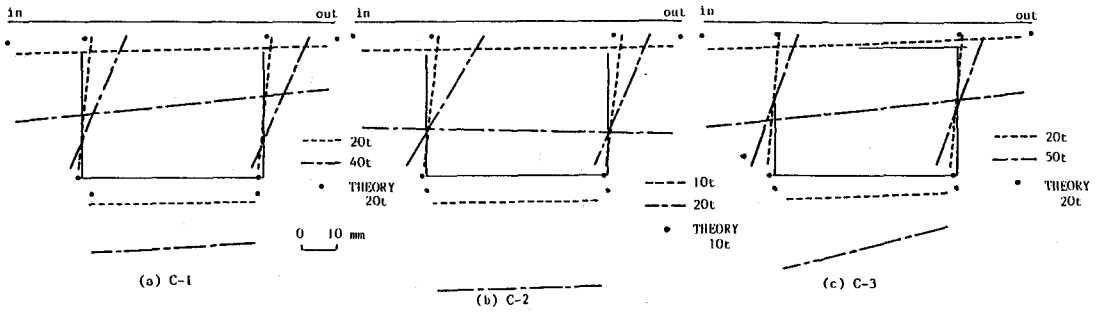


図-5 スパン中央断面変形

く変化し始める点は約17ton、10ton および17ton である。この点は理論値（シェル）に比較すると極めて小さい荷重点である。たわみはある荷重から大きくなり始めるものの、極めて徐々に大きくなっている。これは弾性範囲における大たわみの現象によるものと推察される。また、後述のように破壊はコンクリートの圧壊により生じたが、鋼の降伏はごく一部から始まるため、桁破壊前のたわみが急激に増加していない。

図-5に断面の変形形状を示す。各桁とも弾性域と破壊前の荷重に対するものである。いずれの桁も、桁 C-1はほぼ同じであるが、内側の方が大きいたわみが生じている。これは文献¹⁷⁾ の解析とも同じ傾向を示している。断面変形は各桁とも下フランジ内側で生じている。

3.4 軸方向ひずみ

図-6(a)、(b) に荷重と軸方向ひずみの関係を示す。軸方向ひずみの位置はスパン中央で、下フランジとコンクリート床版上の内側の点である。これらの点は最も大きいひずみを与えるからである。

図-6(a) から示されるように、ひずみは荷重とともにほぼ直線的に増加してゆき、破壊荷重に近づくときひずみは急に大きくなる。この荷重の大きくなる時のひずみはいずれも 1200×10^{-6} であり、これはほぼ降伏ひずみに一致する。桁 C-2における破壊時のひずみは 1400×10^{-6} 程度であり、降伏直後であると考えられる。初期の直線から徐々にひずみが大きくなる点は各桁23ton、11ton および18ton でたわみの場合よりはいく分大きい荷重で生じている。

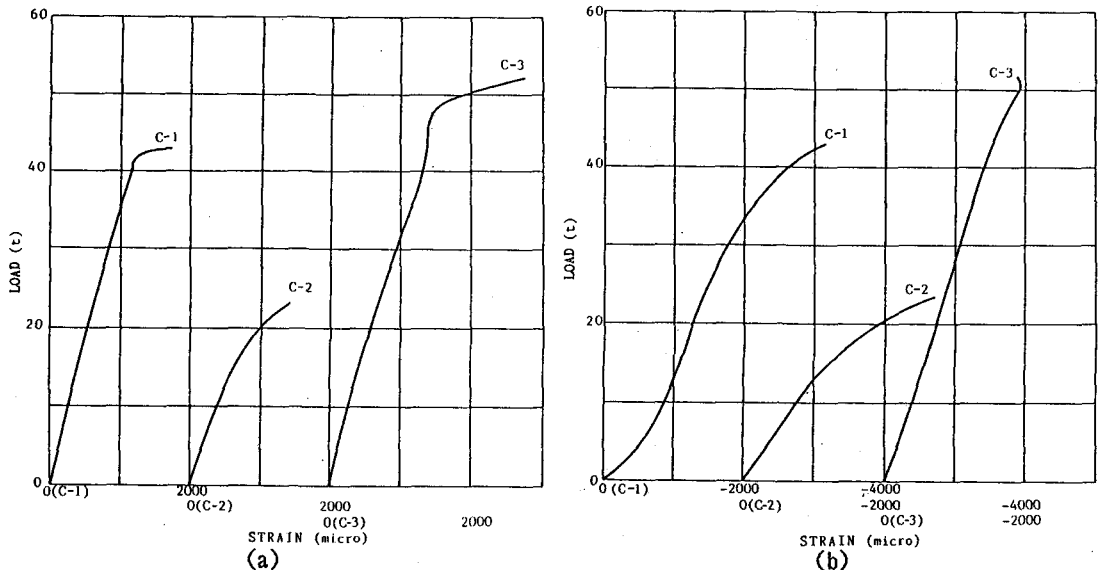


図-6 荷重-ひずみ関係

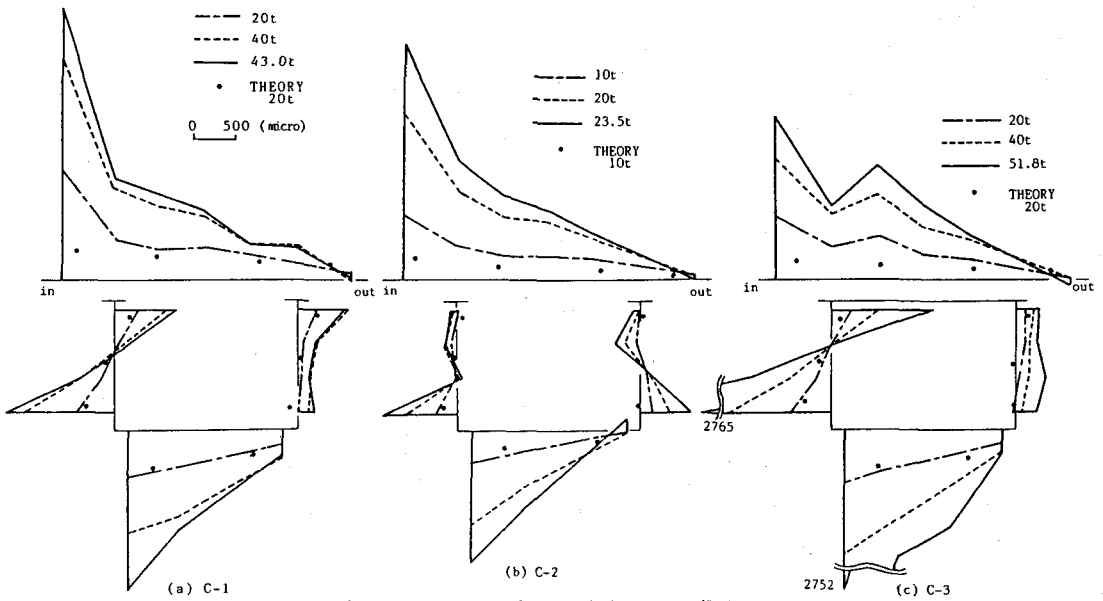


図-7 スパン中央軸方向ひずみ分布

図-6(b)に示される様にコンクリートひずみは鋼とは異なり、破壊直前において急激な増加はみられない。いずれの桁ともコンクリートの圧壊で破壊したが、破壊直前の測定ひずみは 3100×10^{-6} 、 2700×10^{-6} および 1800×10^{-6} を示している。桁 C-3 におけるコンクリートひずみはこのあと急激な増加が生じているものと考えられる。

3.5 軸方向ひずみ分布

図-7にスパン中央における軸方向ひずみ分布を示す。内側コンクリートフランジに極めて大きいひずみが生じている。この部分から圧壊に至った。鋼断面では内側下フランジが最も大きくなる。これらの性状はいずれの桁も同様である。

計算値は実験値よりいく分小さい値を示している。これは要素分割数の不十分によるものと考えられる。

3.6 せん断ひずみ分布

図-8に桁端のせん断ひずみ分布を示す。桁 C-1と C-3 はいずれも曲げに伴うせん断力によるせん断ひずみが、比較的大きいのに対し、桁 C-2はねじりによるせん断ひずみの大きさが目立っている。

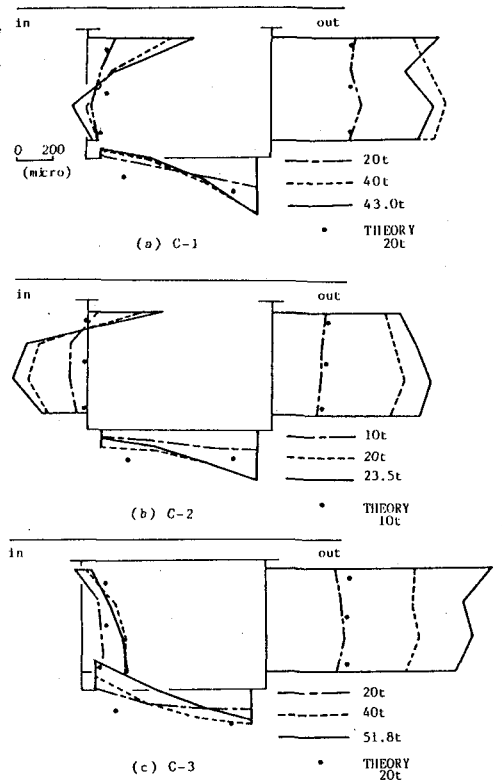


図-8 端せん断ひずみ分布

4. むすび

曲線合成桁の終局耐力試験を行い、その実験的研究を行った。一方、理論的解析としてシェル要素の有限要素法を用いて比較を行った。その結果を要約すれば以下のとおりである。

(1) 理論上の終局耐力は桁端のせん断力により生じ、実験値はこれを上回る。しかし実験値はスパン中

央の曲げによる降伏荷重よりは小さい。

(2) 鋼断面は閉断面が終局耐力上好ましい。

(3) 微小変形の有限要素解析は荷重が小さいときは実験値に比較的良好合うが、変形が大きくなるとかなり差が生ずる。

(4) 今後、簡単な有限変形理論が適用されることが望ましい。

謝辞 本研究は山口大学、琉球大学及び岡崎工業の共同で行われたものである。また、両大学では実験、データ整理および解析に学生諸君の協力を得た。関係者各位に深謝する。

参考文献

- 1) The Task Subcommittee on Box Girders of the ASCE-AASHTO Committee on Flexural Members of the Committee on Metals of the ASCE Structural Division. "Curved Steel Box Girder Bridges: State-of-the-Art." Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 104, No. ST11, pp.1719~1739, Nov.1978.
- 2) Vlasov, V.Z. "Thin-Walled Elastic Beam. National Science Foundation." Nov.1961.
- 3) 小松、小西：薄肉連続曲線桁橋の立体解析、土木学会論文報告集、第91号、pp.13~24、1963年3月
- 4) Alam, K.M., Honglandaromp, T., and Lee, S.L., "Curved Box Girder Bridges with Intermediate Diaphragms and Supports." Pub. of IABSE, Vol. 33-II, 1973.
- 5) Dabrowski, R. Curved Thin-Walled Girders, Theory and Analysis. Springer-Verlag, 1968. Berlin, Germany.
- 6) 坂井、長井：曲線鋼箱桁橋の中間ダイヤフラム設計法に関する一考察、土木学会論文報告集、第305号、1981年1月、pp.11~22
- 7) Turstra, C.J., and Fam, R.M. "Behavior Study of Curved Box Bridges." Journal of the Structural Division, ASCE, 1978. Vol. 104. No. ST3, pp.453~462.
- 8) Cheung, Y.K. "Finite Strip Method in Structural Analysis." Pergamon Press. 1976.
- 9) 坂井、長井：ブロック有限要素による薄肉箱桁の立体解析、土木学会論文報告集、第295号、1980年3月、pp.1~13
- 10) Oleinik, J.C., and Heins, C.P. "Diaphragms for curved box beam bridges." Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 101, No. ST10, Oct. 1975, pp.2161~2178.
- 11) 中井、村山：ダイヤフラムを有する曲線鋼桁橋のずり応力の解析と設計への応用、土木学会論文報告集、第218号、1973年10月、pp.25~39
- 12) 小松、中井、向山：斜支持箱桁橋の静的解析、土木学会論文報告集、第193号、1971年9月、pp.1~12
- 13) 小松、中井：アナログ計算機による曲線桁橋の動的応答解析、土木学会論文報告集、第178号、1970年6月、pp.11~26
- 14) 能町、吉田：断面変形を考慮した曲線箱桁の応力解析、土木学会論文報告集、第187号、1971年3月、pp.1~8
- 15) Heins, C.P. and Humphreys, R.S., "Bending and Torsion Interaction of Box Girders" Journal of ST Div., ASCE Vol. 105, No. ST5, May 1979, pp.891~904
- 16) Heins, C.P., and Lee, W.H. "Curved Box-Girder Bridges: Field Test." Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 107, No. ST2, Feb. 1981, pp.317~327.
- 17) 有住、浜田、大城：箱断面を有する曲線合成桁の静的挙動に関する研究、土木学会論文報告集、第340号、1983年12月、pp.67~76