

箱桁角部を曲線構造とした場合のウェブ座屈に関する研究

Flexural Buckling of Box Girder Bridges with Curved Corners

岩崎 祐次
Yuuji IWASAKI

川田工業(株)橋梁事業部
東京技術部長

小笠原 照夫
Teruo OGASAWARA

川田工業(株)橋梁事業部東京技術部
設計二課課長

越後 滋
Shigeru ECHIGO

川田工業(株)技術開発本部長

内海 靖
Yasushi UCHIUMI

川田工業(株)技術開発本部
技術研究室室長

平野 健二
Kenji HIRANO

川田工業(株)技術開発本部
技術研究室

石文 基明
Motoaki ISHIFUMI

川田工業(株)工事本部東京工事部
工事課

ウェブと下フランジの結合部を曲面構造とする箱桁橋が最近増えてきているが、R付き断面としたことが座屈耐荷力等を与える影響に着目した報告はごく僅かしかない。

本報告では、基礎的な検討としてウェブと下フランジのなす角度を含む断面形状、曲率半径と載荷荷重をパラメータとして線形座屈固有値解析を行った。この解析結果によりR付き断面とすることがウェブの線形座屈荷重にどのような影響をおよぼすのかを定性的に把握することを目的としている。ただし、初期たわみや残留応力の影響は考慮しないこととした。

ここで行った解析によればウェブと下フランジが連成座屈する可能性は極めて低く、また、FEM解析結果は道路橋示方書の規定値に極めて近い傾向を示すことがわかった。

キーワード：箱桁橋，R付き断面，座屈耐荷力

1. はじめに

箱桁橋を計画する際、景観上の配慮から単純な箱形状とするよりはウェブと下フランジの結合部を曲面構造(ここでは以下、R付き断面と記す)とする事例が最近増えてきている。しかしこれまで、R付き断面としたことが座屈耐荷力等を与える影響に着目した報告は、その施工実績と比べてもごく僅かしかない。例えば文献1)ではR付き断面の箱桁橋を設計する際、設計の簡略化を計るために梯形箱桁で詳細設計を行い、この検証としてR付き断面と梯形断面をFEM解析にて比較している。併せて、実橋計測を行って、梯形断面による簡易設計計算の妥当性を確認している。すなわち、この論文で取り扱っているR付き断面が、近似的に梯形断面に置き換えて設計することができることを確認しているのであって、R付き断面の定性的性質を明らかにしている訳ではない。

現行道路橋示方書²⁾に定められている圧縮力を受ける板の座屈は、補剛材のない4辺を単純支持した平板の解析を基礎として、かつ平板に対して行った実験値と比較して安全側になるように設定されている。また補剛材の付いた補剛パネルに対する座屈の規定は、母材と補剛材の必要最小剛比を満足させることによって補剛材間で座屈を生じさせるように導かれている。箱桁に関しては、補剛材間で1次モードの局部座屈を起こす場合を対象として

断面を決定している。また補剛材剛度が不足して全体座屈を起こす懸念のある場合には、補剛材の剛性を無視してダイアフラム間で安定計算を行うこととしている。

R付き断面で懸念される項目について基本的な事項を順に列挙する。

R付き断面を形成するパラメータ(ウェブ高、フランジ幅、曲面を形成する曲率半径、補剛材間隔やウェブと下フランジのなす角度など)がウェブの座屈におよぼす影響

R付き断面とすることがウェブと下フランジの連成座屈におよぼす影響

R付き断面とすることがずり変形やせん断遅れ現象におよぼす影響

R付き断面とすることが終局強度におよぼす影響
架設時などの鉛直力に対する影響

過去に通常の箱桁橋に対して上記 ~ を研究した論文は数多く報告されている^{3)~7)}。

例えば文献3)ではウェブと鋼床板の連成弾性座屈を対象として、上フランジおよびウェブを直交異方性矩形板と見なし弾性座屈解析を行い、箱断面、鋼床板、ウェブなどの縦横比と座屈荷重との関係、鋼床板の縦リブ、横リブ、ウェブの垂直および水平補剛材などの座屈荷重に対する影響を報告している。文献4)ではR付き断面梁としてのせん断遅れ特性を反映させた橋脚柱の設計基準

を策定するために、実験およびFEM解析を行い、断面内の最大曲げ応力の推定方法を提案している。ただし、ここでは橋脚柱を対象としているために長方形断面の4角を同一曲率で曲線構造とした柱をその対象としている。文献5)では、断面変形が曲線箱桁の終局強度におよぼす影響に関して取り扱った研究が少ないとして、曲線箱桁橋に対してずり変形と箱桁構成鋼板要素の局部座屈の影響を考慮した終局強度解析を行っている。対象とする箱桁の断面が軸対称とならない2主箱桁橋のような場合には、このずり変形が終局強度に与える影響を求める必要があるとしている。また様々な荷重状態における終局強度解析は近年盛んに行われており、例えば最近の研究では、文献6)や7)が挙げられる。

上記で示したように、箱桁のフランジの耐荷力に関する検討は、様々な角度から行われており、現行道路橋示方書通りに設計しても問題ないと思われるが、ウェブについてはRが付いたことによる影響は無視できないと考えられる。

本報告では、基礎的な検討としてウェブと下フランジのなす角度を含む断面形状(断面形状(タイプ)については後述する)、曲率半径と載荷荷重をパラメータとして線形座屈固有値解析を行った。この解析結果によりR付き断面とすることがウェブの線形座屈荷重にどのような影響をおよぼすのかを定性的に把握することを目的と

している。なお、ここでは基礎的な解析に限定しており、初期たわみや残留応力の影響は考慮しないこととした。

2. 道路橋示方書の考え方^{8),9)}

現行道路橋示方書では、ウェブを縦横補剛材で囲まれた無補剛板と仮定して耐荷力の照査がなされる。すなわち、縦横補剛材が座屈の節となるような構造を想定していることになる。また、上下フランジは縦横補剛材を考慮して直交異方性板として照査がなされる。この違いは、プレートガーダー橋や箱桁橋の場合、ウェブの座屈が橋全体の崩壊におよぶとは考えられず、むしろフランジ単独の座屈やフランジとウェブとの連成座屈によって橋全体が崩壊すると考えられるからである。

次に道路橋示方書の規定の基となっているDIN4114に記述されている4辺を単純支持した無補剛板の弾性座屈式を下式に示す。

$$e = \frac{2 \cdot E \cdot t^2}{12B^2(1 - \mu^2)} = \left(425 \frac{t}{b}\right)^2 \quad (1)$$

$$1_{cr} = k_e \quad (2)$$

但し、 e :オイラーの座屈応力

1_{cr} : 弾性座屈応力

表1は座屈係数を応力分布別に示したものである。

表1 座屈係数表¹⁰⁾

項目	荷重	座屈応力	適用範囲	座屈係数
(1)	直線分布の圧縮応力 0 1		0 1	$k = \frac{8.4}{+1.1}$
			0 < 1	$k = \left(0 + \frac{1}{0}\right)^2 \frac{2.1}{+1.1}$
(2)	直線分布の圧縮応力および引張応力で圧縮応力の大きい場合: -1 < 0		$1_{cr} = k_e$	$k = (1 +)k' - k'' + 10(1 +)$ ここに k' は = 0の場合の座屈係数(1行欄), k'' は = -1の場合の座屈係数(3行欄)。
(3)	直線分布の圧縮応力および引張応力で両者等しい場合 = -1 または引張応力の大きい場合: < -1		$1_{cr} = k_e$	0 2/3 $k = 23.9$
				0 < 2/3 $k = 15.87 + \frac{1.87}{o^2} + 8.6 o^2$
(4)	等分布せん断応力		$1_{cr} = k_e$	0 1 $k = 5.34 + \frac{4.00}{o^2}$
				0 < 1 $k = 4.00 + \frac{5.34}{o^2}$

3. 解析対象および解析概要

R付き断面箱桁橋を設計する際のパラメータは、ウェブ高、フランジ幅、曲面を形成する曲率半径や補剛材間隔など非常に多い。更にこういったタイプの箱桁橋には、ウェブとフランジが直交するタイプ（ここでは以下、箱型と記す：図1(a)参照）と直交しないタイプ（ここでは以下、逆台形型と記す：図1(b)参照）がある。景観を考慮した場合、この逆台形型が採用される場合が少なくないことから、ウェブと下フランジの取付け角度が座屈荷重におよぼす影響についても検討する必要があると思われる。

そこで本報告では、これら数々のパラメータの中から、断面タイプ（箱型、逆台形型）、ウェブと下フランジ間の曲面の曲率半径、載荷荷重をパラメータとして選択した。

解析モデルとしては、図1に示す箱型と逆台形型の2タイプを作成した。

箱型の解析モデルは、上フランジ幅を固定し、ウェブと下フランジの角度を直角に固定して曲率半径を250 mmから850 mmまで200 mm刻みで変化させることで4タイプのモデルを作成した。このモデルは、ウェブと下フランジの角度を固定したタイプに相当する。また、比較する対象としてウェブと下フランジが直角に交わる通常の箱桁タイプ（ここでは $R=0$ と表記）もモデル化した。

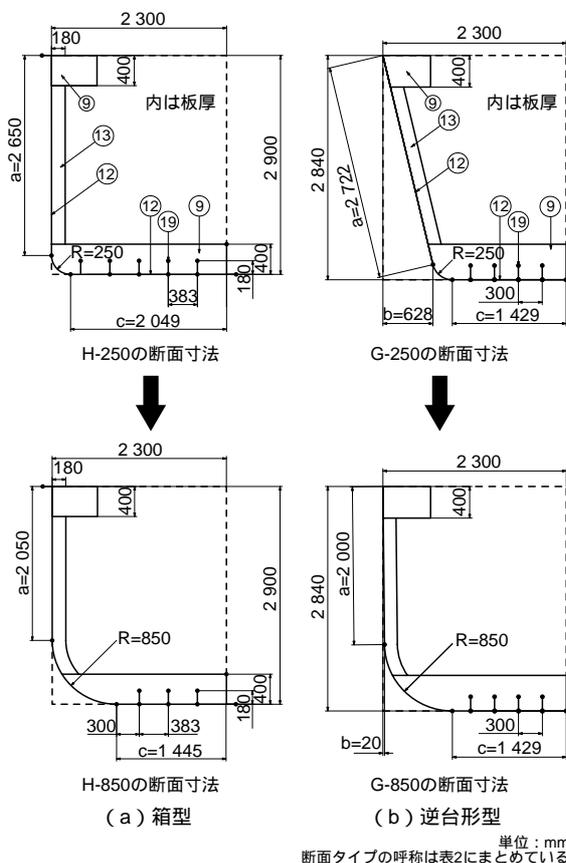


図1 解析対象とした断面寸法

逆台形型は、上・下フランジ幅を固定し、曲率半径を250 mmから850 mmまで200 mm刻みで変化させた4タイプのモデルを作成した。このモデルは、ウェブと下フランジのなす角度を様々に変えたタイプに相当する。

箱型、逆台形型共にウェブと下フランジの連成座屈の発現を確認するために、通常はウェブの圧縮側に配置されるべき水平補剛材を取り付けていない。さらに、2つのタイプに共通する最小の曲率半径 ($R=250$ mm) は、道路橋示方書15.3.2(7)冷間加工の項で規定されている板厚 ($t=12$ mm) に対する曲げ加工の基準 ($R=250 \cdot 15 \cdot t=15 \times 12=180$) を満足している。また、荷重が載荷される両端付近での変形や応力などのばらつきが考えられたので、パネル数を変えた解析を3ケース (3パネル, 5パネル, 7パネル) 行い、その中で端部の応力のばらつきが中央パネルにおよぼす影響が少なく、かつ解析時間の少ない15パネル (1パネル長=約1.5 m) のモデルを採用した (図2参照)

載荷荷重は、この曲線部分に圧縮力が作用した場合が最も懸念される座屈が生じやすい状態であることから負曲げ載荷とした。また、載荷荷重は桁断面の下から1/2、

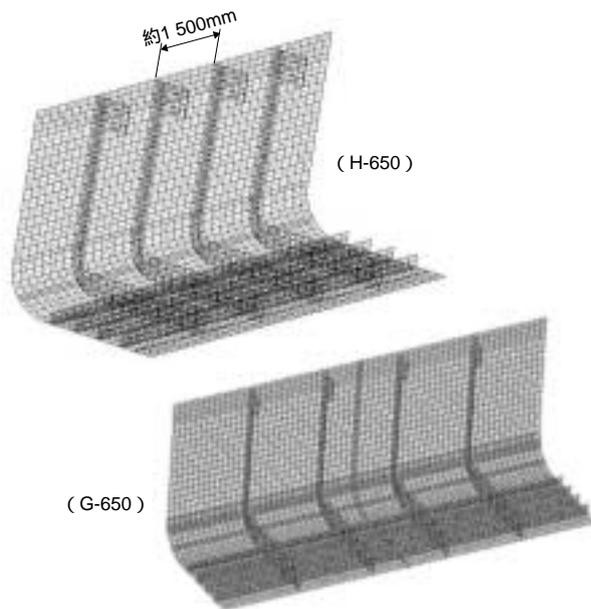
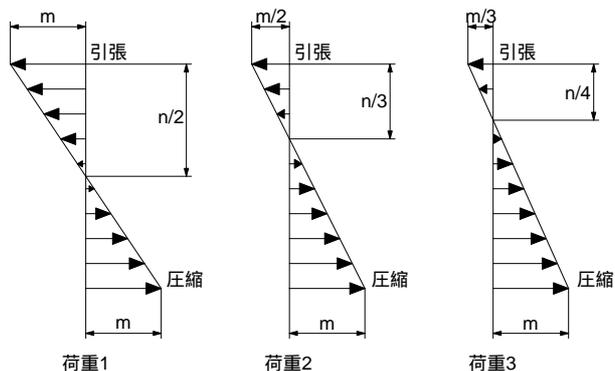


図2 解析対象としたモデルの一例



但し m , n は、座屈固有値解析を行うことから任意としてよい。

図3 載荷荷重

2/3および3/4の位置にそれぞれ中立軸を仮定し、図3の荷重を図4のように載荷した。

境界条件を図4に示す。上フランジと左右ウェブとの交点、下フランジと右ウェブとの交点の計3ヶ所を3軸方向固定とした。すなわち、着目している左側ウェブと下フランジの交点には支点を設けていない。

ウェブの座屈は1次モードの座屈が最も起こりやすいと思われることから、図5にあるように中央パネルのウェブの1次モードの座屈にのみ着目することとした（ここで“1次モード”という場合には、図5の中央パネルのウェブに現れているモードを指すこととする）。

なお表2に今回実施した解析ケースと呼称、下フランジの最低板厚等をまとめている。

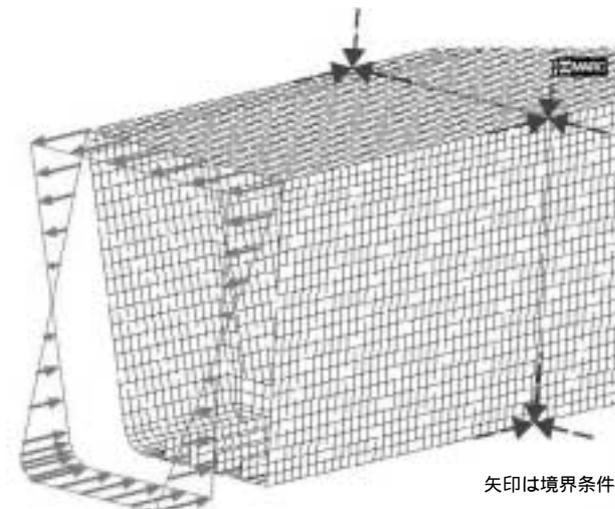


図4 荷重載荷方法及拘束条件 (G-250-1)

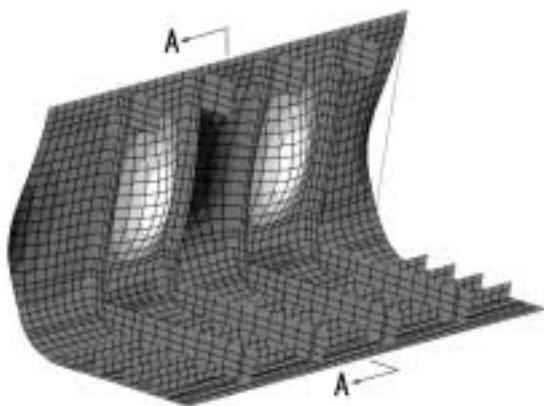


図5 中央パネルの変形図の一例 (H-650)

4. 解析結果

角部が曲線であることによってウェブと下フランジが連成して座屈する可能性が懸念されたが、下フランジが座屈するまで解析を行った結果、ウェブと下フランジが連成して座屈する現象は確認できなかった。さらに、図5や図9で示すようにウェブが単独で座屈するモード（1次モード）が他の座屈モードよりも卓越して発生することを確認した。この1次モードの変形は、図9からもわかるようにウェブの変曲点付近が節になるようなモードであり、その変形は曲線部へはほとんど影響していなかった。

図10～15では、中央パネルで図5に示すような1次モードが発現する場合の座屈荷重をまとめた。ここで解析対象としたモデルは、図6, 7で示すように曲率半径ごとにウェブの直線域（図7中にあるようにこの領域を以下ウェブ平板と呼ぶ）が変化することから、有効座屈長も変化することになる。ただしここでは荷重1に関するのみ表示しているが、その他の荷重についても同様のこと

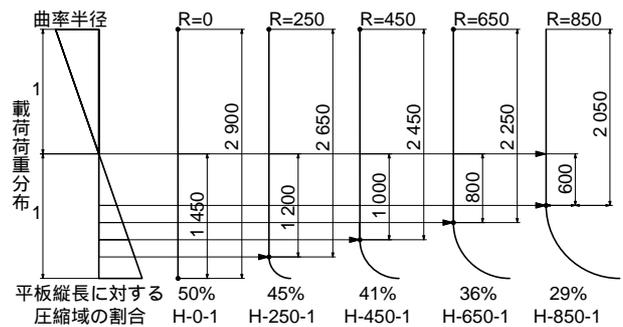


図6 載荷荷重と圧縮域 (箱型)

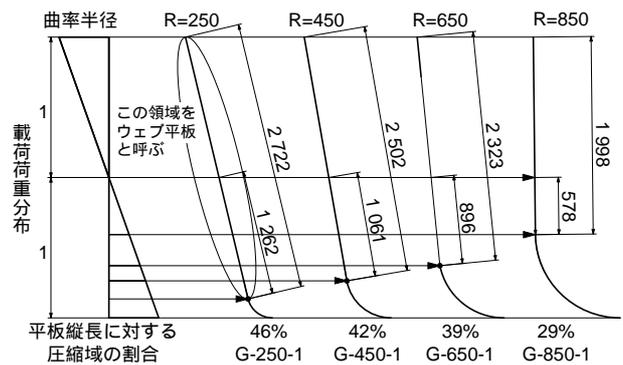


図7 載荷荷重と圧縮域 (逆台形型)

表2 検討ケースと呼称

	呼称 ^{*1)}	a ^{*2)}	b ^{*2)}	c ^{*2)}	曲率半径 (R)	縦リブ本数	縦リブ間隔	単位:mm
								下フランジ 必要最低板厚 ^{*3)}
箱型(H)	H-250	2 650	-	2 049	250	5	383	3.4
	H-450	2 450	-	1 849	450	4	383	3.7
	H-650	2 250	-	1 638	650	4	383	3.3
	H-850	2 050	-	1 445	850	3	383	3.6
逆台形型(G)	G-250	2 722	628	1 429	250	4	300	2.9
	G-450	2 502	428	1 429	450	4	300	2.9
	G-650	2 323	228	1 429	650	4	300	2.9
	G-850	2 000	20	1 429	850	4	300	2.9

*1) 上記呼称に載荷条件を付随して付けることとする。例えば、H-250に荷重1を載荷した場合には、H-250-1と呼ぶ。

*2) a, bおよびcは、図1中に記載された寸法値。

*3) 現行道路橋示方書中の3.2.3圧縮応力を受ける補剛板の項で規定されている最小板厚。

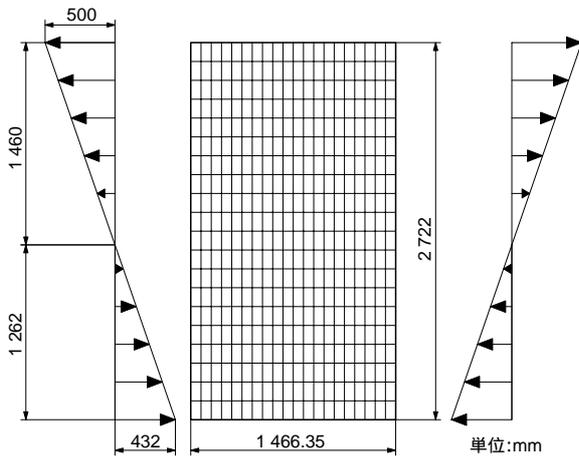


図8 平板解析の要素分割と載荷状況 (G-250-1)

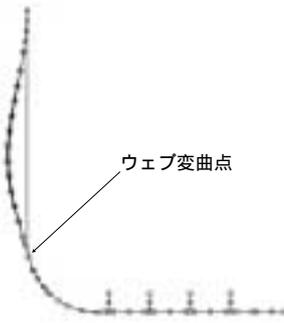
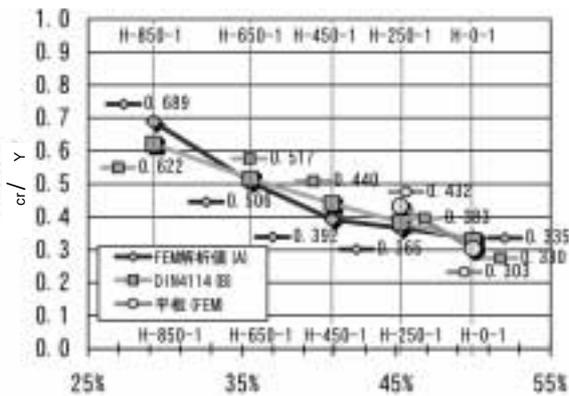
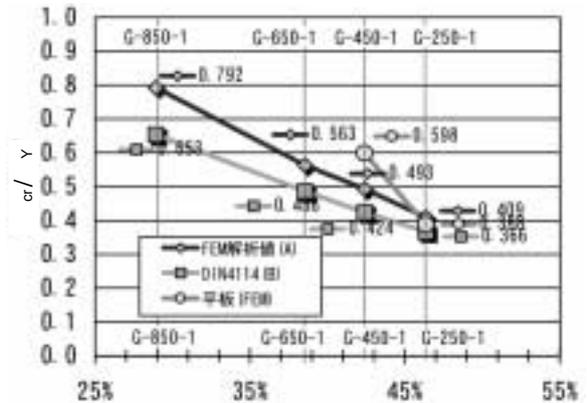


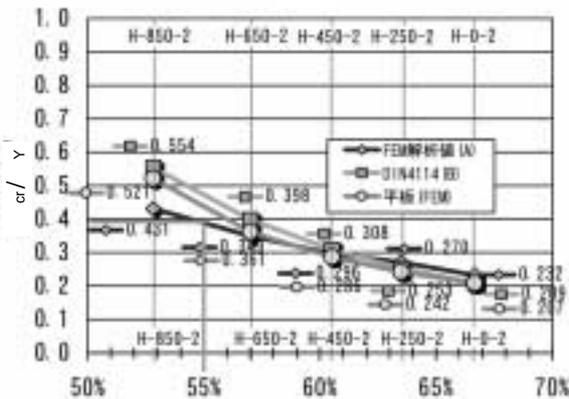
図9 パネル中央の変位状況 (図5の中のA-A断面)



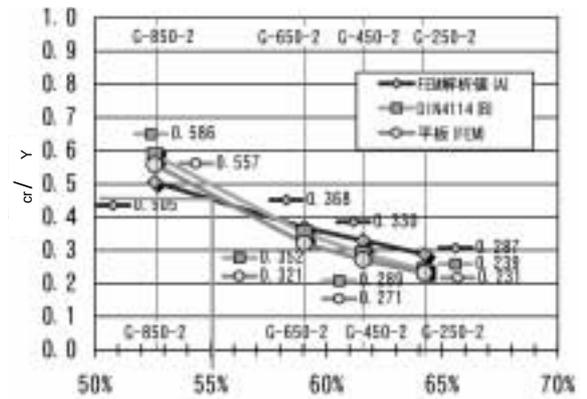
ウェブ平板長に対する圧縮域の割合
図10 線形座屈応力 (箱型: 荷重1)



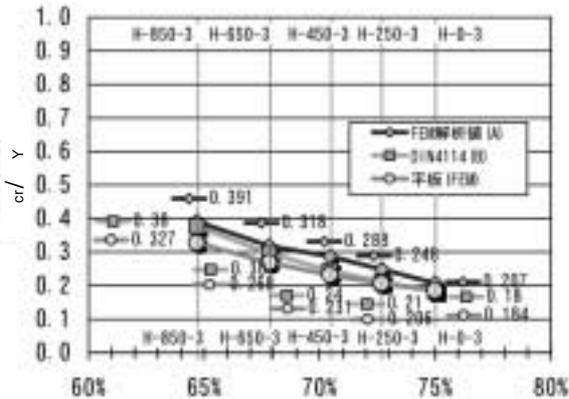
ウェブ平板長に対する圧縮域の割合
図11 線形座屈応力 (逆台形型: 荷重1)



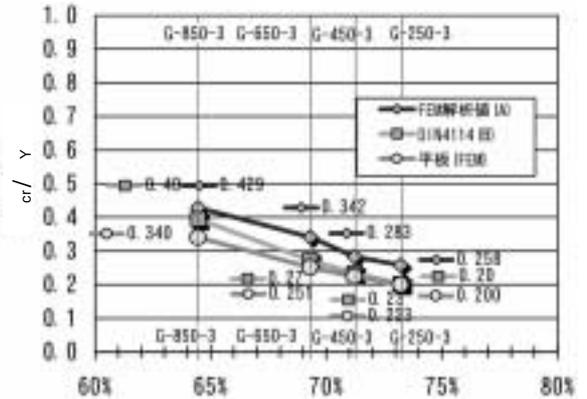
ウェブ平板長に対する圧縮域の割合
図12 線形座屈応力 (箱型: 荷重2)



ウェブ平板長に対する圧縮域の割合
図13 線形座屈応力 (逆台形型: 荷重2)



ウェブ平板長に対する圧縮域の割合
図14 線形座屈応力 (箱型: 荷重3)



ウェブ平板長に対する圧縮域の割合
図15 線形座屈応力 (逆台形型: 荷重3)

が いえる。また、ウェブと下フランジの連成座屈の可能性が低いことから、ウェブの座屈荷重がウェブ平板の圧縮領域に比例すると仮定して、ウェブ平板における圧縮領域の割合を横軸にして整理した。比較する対象として、**図8**にあるように垂直補剛材を含まない11パネル分のウェブ平板を取り出して、本解析と同じ荷重を作用させた解析を行い、1次モードにおける座屈応力を算出した結果を付記した。この平板の境界条件は、4辺を単純支持したものである。なお、現行道路橋示方書の規定（鋼橋編3.2 圧縮応力を受ける板及び補剛板）はDIN4114を基にしていることから、DIN4114の規定により求めた弾性座屈応力（式（1）、（2））を併記している。

ウェブの耐力は、載荷荷重や断面形状の違い、ウェブの傾きによる定性的な影響は見られず、ウェブ平板の圧縮領域の割合にほぼ線形に対応することが確認できた。また同様にパラメータを様々に変化させてもDIN4114の値との差は僅かであった。さらに、平板長に対する圧縮領域の割合が大きくなるに従って、DIN4114の値より解析結果の方が大きな値となる傾向にある。

同一荷重下で、圧縮領域の割合が同じ時の耐力は、箱型よりは逆台形型の方が1割程度高くなる傾向にある。例えば荷重2で圧縮領域の割合が55%の場合、箱型では約0.4、逆台形型では約0.45であり、逆台形型の方が13%程度大きな座屈耐力を示している。これは、座屈耐力に関する箱型と逆台形型の定量的な差であると考えられる。これが終局強度解析であれば、その耐力がR付き断面にしたことによるせん断遅れの軽減効果によるものの可能性はあるが、ここで行ったような線形座屈固有値解析において、せん断遅れの軽減効果による可能性は極めて低いと考えられる。

図10,11において圧縮領域の割合が低い場合には平板の座屈解析結果がDIN4114の結果と合わなくなっているが、ここで着目している1次のモードが圧縮領域の割合の低い領域では出現しづらいことに起因している。また平板解析で結果の表示がない部分は、該当するモードが出現しなかったため記載できなかった。

5. おわりに

断面タイプ、曲率半径および載荷荷重をパラメータとして線形座屈固有値解析を行い、ウェブと下フランジ間を曲線構造とすることによる座屈荷重におよぼす影響を検討した。ここで行った解析によればウェブと下フランジが連成座屈する可能性は極めて低く、また、FEM解析結果は道路橋示方書の規定値に極めて近い傾向を示すことがわかった。

しかし、**図10~15**において横軸としたウェブ平板における圧縮領域の割合だけで、これらの解析結果を正しく

評価しているか否か疑問が残る。例えば、対象となるウェブ直線域での最大圧縮荷重と最大引張域荷重の比（通常で示される応力勾配）は考慮されていない。これらを正しく評価することも今後の課題であると思われる。

R付き断面の特徴として、通常の長方形箱桁断面梁にみられるようなせん断遅れ現象が軽減されることが知られている。このせん断遅れ現象がここで取り扱った軸対称とならない断面を持つ2主箱桁橋の断面力に与える影響や、ずり変形に対する影響、さらにこういった断面の変形が終局挙動に与える影響など終局強度に対して懸念される事柄に関して研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 松崎, 久保田, 嶋田, 宮本: 景観を考慮した梯形鋼箱桁の設計, 橋梁と基礎, Vol.25, No.11, pp.13-19, 1991.11.
- 2) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説(鋼橋編), 1996.12.
- 3) 米沢, 三上: 箱桁の弾性座屈について, 土木学会論文報告集, 第120号, pp.8-13, 1965.8.
- 4) 中井, 北田, 松本, 坂口: コーナー部を円弧状とした薄肉鋼箱断面梁のせん断遅れ特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.1121-1129, 1992.3.
- 5) 有住, 矢吹: 曲線薄肉箱桁の断面変形と強度, 土木学会第46回年次学術講演会概要集, pp.628-629, 1991.9.
- 6) 中井, 北田, 村山, 室塚: 曲げとねじりを受ける箱桁の終局強度に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.71-82, 1996.3.
- 7) 宇佐見, 土屋, 福本: 鋼圧縮部材の連成座屈挙動の理論的研究, 土木学会論文報告集, 第362号, pp.303-312, 1985.10.
- 8) (社)日本橋梁建設協会: デザインデータブック, p.259, 2001.3.
- 9) (社)土木学会: 座屈設計ガイドライン, pp.204-205, 1987.10.
- 10) 関西道路研究会・道路橋調査研究委員会編: コンピュータによる鋼橋の終局強度解析と座屈設計, 共立出版(株), p.9, 1998.2.