

合成箱桁における波形腹板のせん断強度特性

Ultimate strength of pre-stressed concrete box girders with steel corrugated web in shear

廣瀬恵子*, 明田啓史**, 堂垣正博***

Keiko HIROSE, Hiroshi AKETA, and Masahiro DOGAKI

* 修士(工学) 元関西大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程学生

** 松尾橋梁(株) (〒590-0977 堺市大浜西町3)

*** 工博 関西大学教授 工学部都市環境工学科 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

The composite box girder with corrugated steel webs has a lot of advantages, which are high shear strength capacity and accordion effect, etc. In this paper, the deformation and load-carrying capacity of composite rectangular and trapezoidal box girders consisted of pre-stressed concrete flanges and corrugated steel webs in shear is numerically investigated by elasto-plastic large deformation analysis using the finite element soft-wear package MARC 2001. The numerical computation clarifies the influence of the width-to-thickness ratio of web, the aspect ratio of web, the shape of corrugated webs, and the inclination of webs on the deformable performance and ultimate strength of PC box girders in shear. The ultimate strengths of the corrugated steel webs in composite box girders are given for various parameters, i.e., the width-to-thickness ratio of web plate, the aspect ratio of corrugated plate panel, the shape of corrugated webs, and the inclination of webs by parametric analysis.

and

Keywords : *PC box girder, corrugated steel web, deformable performance, ultimate strength, shear buckling of corrugated steel web*

キーワード: PC箱桁, 波形鋼板, 変形, 終局強度, 腹板のせん断強度

1. まえがき

折板構造の鋼板からなる腹板（以下、波形腹板と称する）とプレストレストコンクリート床版（以下、PC床版と称する）で構成された合成箱桁橋は、スウェーデンの古典的建築物に使われた折板の力学的特性を巧みに活かした橋梁である。

波形腹板が用いられた合成箱桁では、折板の傾斜パネル部分が、平坦な腹板に設けられる垂直補剛材と同じように、座屈時に面外変形の節として働く可能性があるため、強いせん断耐力が期待でき、腹板の薄肉化が一層可能となる。それゆえ、コンクリート製腹板が主桁の20～30%の重量を占める従来のPC橋に比べて、主桁の重量が大幅に軽減される。その結果、橋梁の長支間化やスレンダーな下部構造の採用が可能となる。また、波形腹板は折り曲げられた方向すなわち橋軸方向に面内力を受けても、それはあたかもアコーディオンのようにスムーズに伸縮できるため、その橋軸方向の伸び剛性が工学的に無視できるほど小さいという特長を有している。それゆえ、コンクリート製床版へのプレストレスト力が腹板に逸散することなく効率的に導入できる。波形腹板は、ま

た、コンクリート製床版のクリープ・乾燥収縮・温度変化などによる変形を拘束しない。さらに、波形鋼板の採用で現場作業が従来のコンクリート製腹板に比べて省力化でき、施工の合理化や工期の短縮が図れる。

ところで、島田は1969年、わが国で初めて波形鋼板のせん断崩壊メカニズムを明らかにした¹⁾。同年、EasleyとMcFarlandはせん断力を受ける波形鋼板の弾性座屈強度算定式を提案した²⁾。Easleyは1975年にも種々の境界条件の場合の算定式を提案した³⁾。その後、波形鋼板の凹凸形状によっては、その全体座屈とともに局部座屈や全体座屈と局部座屈の連成が重要であることが明らかにされた⁴⁾。山崎は実物大供試体による載荷実験を行い、既往の耐荷力算定式を比較・検証した⁷⁾。その結果は、鋼板ウェブ合成構造研究会が施工実績や研究成果に基づいてまとめた「波形鋼板ウェブPC橋—計画マニュアル(案)—」⁵⁾に掲載されている。

上平・立神・本田・園田⁶⁾は、波形腹板の座屈強度とは直接的に関係ないが、せん断変形に敏感な波形鋼板の波形形状や箱桁の断面形状とせん断やねじり剛性との関係を研究し、ねじりによるせん断応力、ねじり定数、せん断剛性などを評価した。彼らの評価式は上述のマニ

アルで取り上げられている。

腹板に波形鋼板を用いた PC 橋の強度設計は、設計・施工の段階で鋼板やコンクリートの設計基準や既往の実験・研究の成果を参考に、実証実験なども実施してなされている。また、上述のマニュアルも参考にされている。

腹板に波形鋼板が用いられた合成箱桁の変形や強度に関する研究の歴史は、平坦な鋼箱桁の研究に比べれば、比較的浅い。また、波形鋼板の変形とせん断強度に関する研究の多くは、フランジと腹板がともに鋼板からなるホモジニアスな桁に対してなされている。

ここでは、上フランジがコンクリート製平板、腹板が波形鋼板、下フランジがプレストレストされたコンクリート製平板からなる合成箱桁を対象に、その波形腹板のせん断変形特性と強度に着目した弾塑性有限変位解析を汎用有限要素解析プログラム“MARC 2001”によって行い、波形腹板の幅厚比、折板パネルの縦横比、波形腹板の形状係数、腹板の傾斜が合成箱桁における波形腹板のせん断変形特性と腹板が分担するせん断力に及ぼす影響について検討する。

2. 波形腹板が用いられた合成箱桁の弾塑性有限変位解析

波形鋼板が腹板に用いられた合成箱桁を対象に、曲げ強度がほとんど期待できず、せん断強度が重要な波形腹板の変形挙動を汎用有限要素解析プログラム“MARC 2001”による弾塑性有限変位解析によって明らかにする。以下、解析モデル、解析手法などについて述べる。

2.1 波形腹板が用いられた合成箱桁橋の実績調査

既設橋における波形腹板の形状寸法の実績調査結果に基づき、腹板に波形鋼板を用いた合成箱桁の解析モデルを決定する。既設橋で用いられている波形腹板の形状寸法を Table 1 に示す。ここに γ は波形鋼板の形状を表すパラメータすなわち形状係数で、Fig.1

に示す水平長 l' と実長 ($l_1 + l_2 + l_3$) の比

$$\gamma = \frac{l'}{\sum_{i=1}^3 l_i} \quad (1)$$

である。また、 a ：波形腹板の橋軸に平行なパネルの幅、 b ：波形腹板の斜方向パネルの橋軸方向投影幅、 c ：波形腹板の斜方向パネルの幅、 d ：波高。

Table 1 から明らかなように、実橋では、パネル幅が $a=430\text{mm}$ 、波高が $d=220\text{mm}$ 、形状係数が $\gamma=0.93$ の波形鋼板が多用されている。実橋の形状係数は、興津川橋の $\gamma=0.98$ を除き、 $\gamma=0.90\sim 0.95$ の範囲にある。

本研究では、実績調査結果を踏まえ、パネル幅が $a=430\text{mm}$ 、波高が $d=220\text{mm}$ 、形状係数が $\gamma=0.93$ の波形腹板を基本系とする。

2.2 解析対象桁と構成材料の機械的性質

(1) 解析モデル

解析パラメータに波形腹板の幅厚比と縦横比、波形腹

Table 1 既設橋における波形鋼板の形状

橋 名	a	b	c	d	Σl	l'	γ
コニャック橋	353	319	353	150	706	672	0.95
モーブレ橋	284	241	284	150	568	525	0.92
ドール橋	430	370	430	220	860	800	0.93
新開橋	250	200	250	150	500	450	0.90
銀山御幸橋	300	260	300	150	600	560	0.93
本谷橋	330	270	330	200	660	600	0.91
前谷橋	430	370	430	220	860	800	0.93
中野PC桁橋	430	270	330	200	660	600	0.91
鍋田高架橋	430	370	430	220	860	800	0.93
勝手川橋	430	370	430	220	860	800	0.93
興津川橋	512	488	512	150	1,024	1,000	0.98
下田橋	430	370	430	220	860	800	0.93
小犬丸川橋	430	370	430	220	860	800	0.93
小河内川橋	430	370	430	220	860	800	0.93
大内山川第二橋	430	370	430	220	860	800	0.93

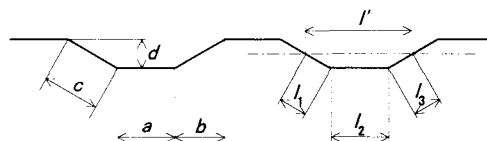


Fig.1 波形腹板の断面形状 (単位:mm)

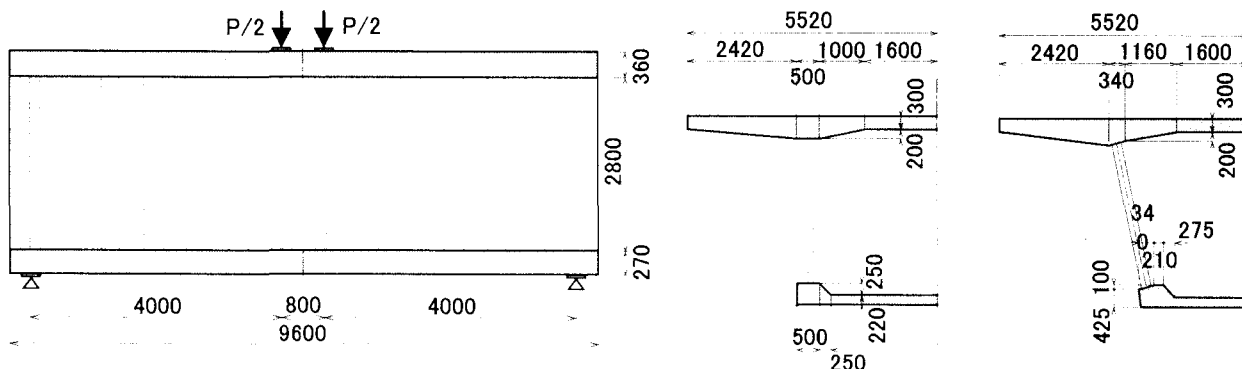


Fig.2 解析モデルの側面図と断面図 (単位:mm)

板の形状係数、腹板の傾斜角を選び、これらが波形腹板のせん断変形挙動と腹板が分担するせん断力に及ぼす影響を明らかにする。解析モデルの側面図と断面図をFig.2に示す。解析モデルは波形鋼板が用いられたI桁や合成箱桁によるせん断実験などの供試体を参考に決定した。また、長方形箱桁と逆台形箱桁の断面形状は、波形鋼板が採用された「本谷橋」と「銀山御幸橋」を参考に決定した。なお、荷重集中点での腹板のクリッピングを避けるため、載荷点と支点のフランジに載荷板を、腹板に垂直補剛材を設けた。

波形腹板の形状はFig.3のようである。Fig.3(a)は、形状係数を $\gamma=0.93$ に固定し、パネル幅をパラメータに選んでさまざまな形状の合成桁を解析する場合の基本形状である。Fig.3(b)は、支点上と荷重直下の腹板に設けられる垂直補剛材が波形腹板の斜方向パネルの中心に位置するような桁を対象とする場合の波形腹板の断面形状である。寸法諸元をTable 2に示す。ただし、形状係数をパラメータとした解析の場合には、軸方向パネル幅と斜方向パネル幅は実橋寸法と多少異なる。

(2) 合成箱桁を構成する材料の機械的性質

鋼板（鋼種：SM400）とコンクリートの機械的性質をTable 3に示す。上下コンクリート床版は圧縮および引張の力を受けるため、その圧縮と引張の降伏点応力を同表のように決めた。ただし、プレストレス力は下コンクリート床版に直接導入せず、それと等価な効果として、初期に圧縮力が導入されるコンクリートの圧縮および引張の降伏点応力をそれぞれ導入圧縮応力分だけ高い値 $\sigma_{yc}=81.5\text{MPa}$ 、 $\sigma_{yt}=17.5\text{MPa}$ に設定した。

なお、コンクリートの応力-ひずみ関係には圧縮応力域でtri-linear、引張応力域で降伏後に完全徐荷される曲線などが考えられる。ここでは、コンクリートの応力-ひずみ関係の精度に多少のラフさはあるが、Fig.4のように仮定した。

2.3 合成箱桁の弾塑性有限変位解析に必要な解析ツールと解析条件

(1) 採用する有限要素解析ツール

せん断力が作用する合成箱桁において、波形腹板の変形挙動と強度特性を明らかにするため、汎用有限要素解析プログラム“MARC 2001”を用いて弾塑性有限変位解析を行う。Up-dated Lagrangian手法で定式化された4節点4辺形厚肉シェル要素を腹板と垂直補剛材に、3次元6面体ソリッド要素を上コンクリート床版に、PC鋼棒が等価な版に置換された下コンクリート床版に3次元8節点

Table 2 数値解析に用いるパラメータ値(単位:mm)

Model	橋軸方向 パネル幅	斜方向パ ネル幅	波高	腹板傾斜 角	形状係数	幅厚比	波高幅厚 比
	a	c	d		γ	μ	η
430/08	430	430	220	90	0.93	350	27.5
430/10						280	22.0
430/12						233	18.3
430/96		403	160		0.96	280	16.0
430/98		386	110		0.98		11.0
430/99		378	77		0.99		7.7
430/50		430	220	50		365	22.0
430/60				60		323	22.0
430/70				70		298	22.0
538/08	538	538	276	90	0.93	350	34.5
538/10						280	27.6
538/12						233	23.0
538/96		504	200		0.96	280	20.0
538/98		482	137		0.98		13.7
538/99		472	97		0.99		9.7

Table 3 鋼とコンクリートの機械的性質

	鋼		コンクリート	
ヤング率	206GPa		34.3GPa	
ポアソン比	0.3		0.2	
降伏点応力	腹板	245MPa	上床版	76.9MPa
	PC鋼棒	1,980MPa	下床版	5.0MPa
導入プレストレス力			12.5MPa	

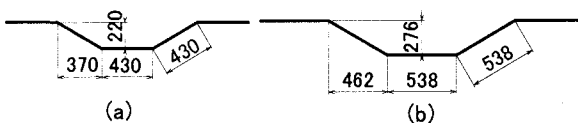


Fig.3 波形腹板の形状寸法(単位:mm)

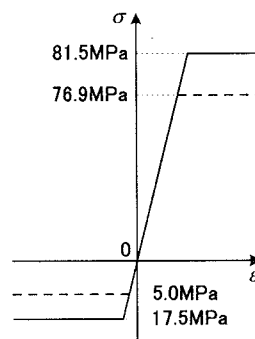


Fig.4 コンクリートの応力-ひずみ関係

複合要素を用いた。非線形剛性方程式の解法にNewton-Raphson法と弧長増分法を選択した。波形腹板の場合、降伏条件にvon Misesの等価応力、流れ則にPrandtl-Reussの塑性流れ則、硬化則に混合則を用いた。

なお、コンクリートが引張力を受けて降伏した後、コンクリートの負担力は減少するとともにクラックの発生と進展が考えられる。ここではその影響を無視した。

(2) 境界・対称条件と載荷法

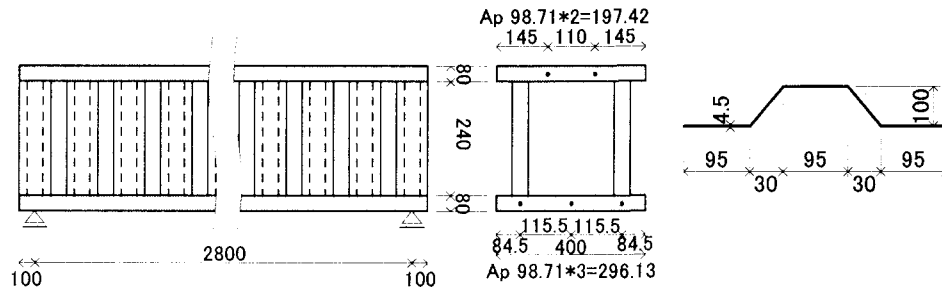


Fig.5 西田・長谷川・前川による実験で用いられた供試体

Table 4 鋼とコンクリートの機械的性質

	鋼	コンクリート
ヤング率	200GPa	34.3GPa
ポアソン比	0.3	0.15
降伏点応力	腹板 392MPa	上床版 76.9MPa
	PC鋼棒 1,980MPa	下床版 5.0MPa
導入プレストレスト力		12.5MPa

合成箱桁のせん断変形挙動を弾塑性有限変位解析によって明らかにするが、支間中央での桁軸方向の対称性と箱桁断面の左右の対称性を勘案し、1/4領域を解析した。境界条件や対称条件は、つぎのとおりである。

- ・スパンの中央と断面の中央に対称条件を与える。
- ・箱桁の横倒れは考えにくいので、念のため、支点上と載荷点で側方への変形を拘束する。
- ・鉛直荷重として、それに等価な鉛直変位を与える。この場合、作用荷重をスパン中央に設けた2本の垂直補剛材直上に与える。その量 δ は

$$\delta_y = 2L' \frac{\tau_y}{G} \quad (2)$$

のたわみを基準に増分として与える。ここに、 L' :支点上と荷重直下に設けられた垂直補剛材間の間隔、 τ_y :降伏せん断応力($\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3}$)、 G :せん断弾性係数($=E/2(1+\nu)$)、 E :ヤング率、 ν :ポアソン比。

(3) 有限要素による波形腹板と上下床版の離散化

波形腹板は、折板の一パネルを桁軸方向に4要素、桁軸直角方向に20要素に離散化した。上下床版は、腹板との接合部で腹板の節点を共有し、桁軸方向に腹板と同じ

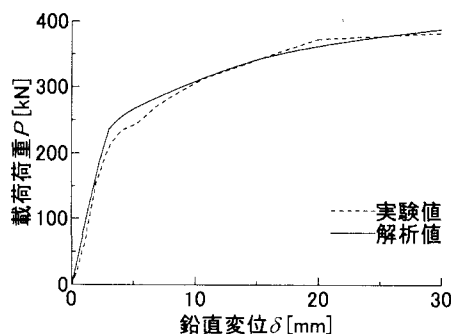


Fig.6 載荷荷重—鉛直変位曲線における本解と実験結果との比較

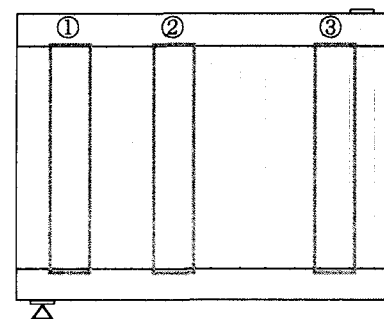
要素数、桁軸直角方向に腹板—フランジ中央間を離散化した。垂直補剛材は、腹板との接合部で腹板の節点を共有し、桁軸直角方向に腹板と同じ20要素で離散化した。腹板と垂直補剛材は9層の積層構造にモデル化した。

3. 数値解析結果とその考察

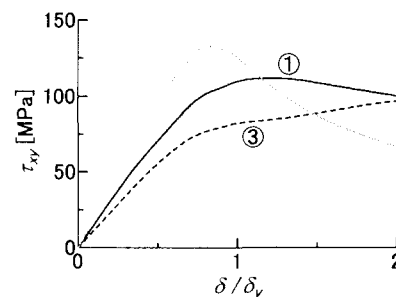
2.で述べた解析モデルと解析条件のもとに合成箱桁の弾塑性有限変位解析を行い、腹板に波形鋼板が用いられる合成箱桁の変形挙動と終局強度を明らかにする。

3.1 既往の実験結果による本解の妥当性の検証

本解析法の妥当性と解の精度を検証するため、西田・長谷川・前川による合成箱桁の実験結果⁸⁾を用いる。彼らの実験供試体と波形腹板の断面形状を Fig.5 に示す。この場合、形状係数は $\gamma=0.63$ である。これは、Table 1 に示した既設橋のそれと比較すれば、実橋で一般に採用される形状係数 $\gamma=0.93$ とはかなり異なり、腹板は凹凸の大きい断面形状である。構成材料の機械的性質は Table 4 のようである。



(a) 平均せん断応力を求める断面



(b) 平均せん断応力と鉛直変位の関係

Fig.7 各断面での平均せん断応力の比較

載荷点での鉛直荷重—鉛直変位関係を図示すれば、Fig.6を得る。同図から明らかなように、解析解は実験結果と極めてよく一致し、上下コンクリート床版と波形腹板のモデル化や解析ツールの条件設定が適切になされていることがわかる。なお、この実験は波形腹板のせん断座屈強度特性よりも上下コンクリート床版・PC鋼棒・波形腹板からなる合成箱桁の全体挙動に注目したもので、上下コンクリートとPC鋼棒の降伏が腹板の座屈より先行するように設計されている。

3.2 波形腹板が用いられた合成箱桁の変形とせん断強度

波形腹板の幅厚比や波形形状などをパラメータに広範なパラメトリック解析を行う前に、波形腹板が用いられた合成箱桁の変形挙動をパネル幅が $a=430\text{mm}$ 、波高が $d=220\text{mm}$ 、形状係数が $\gamma=0.93$ で、腹板厚が $t_w=10\text{mm}$ の桁で調べた。

Fig.7(a)に示す3断面すなわち①支点近傍、②腹板に最大面外たわみが生じる近傍、③載荷点近傍、における平均せん断応力と鉛直変位との関係を求めると、Fig.7(b)を得る。ここに、平均せん断応力とは、桁高方向に分布するせん断応力の総和を腹板の断面積で除した値である。図から明らかなように、領域①では安定した平均せん断応力—鉛直変位関係を示す。つぎに、領域②ではせん断降伏後に顕著なせん断応力の低下を引き起こしている。領域③では、領域②でのせん断応力の減少とともに応力の再配分が起り、せん断応力が増加する傾向にある。また、領域③は領域①や領域②より大きな曲げモーメントを受けるため、下コンクリート床版はより強い引張力を受け、早期に降伏する。下床版の降伏後には、桁の曲げ応力分布が弾性状態とは異なるようになるため、腹板のせん断応力の分布も変化

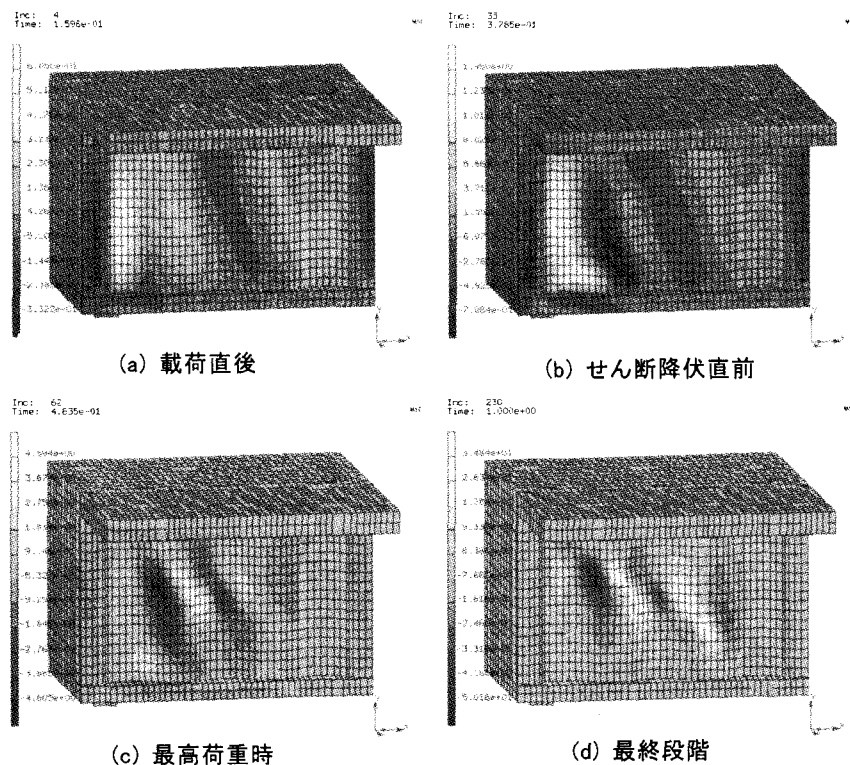


Fig.8 荷重段階毎の腹板の面外たわみ

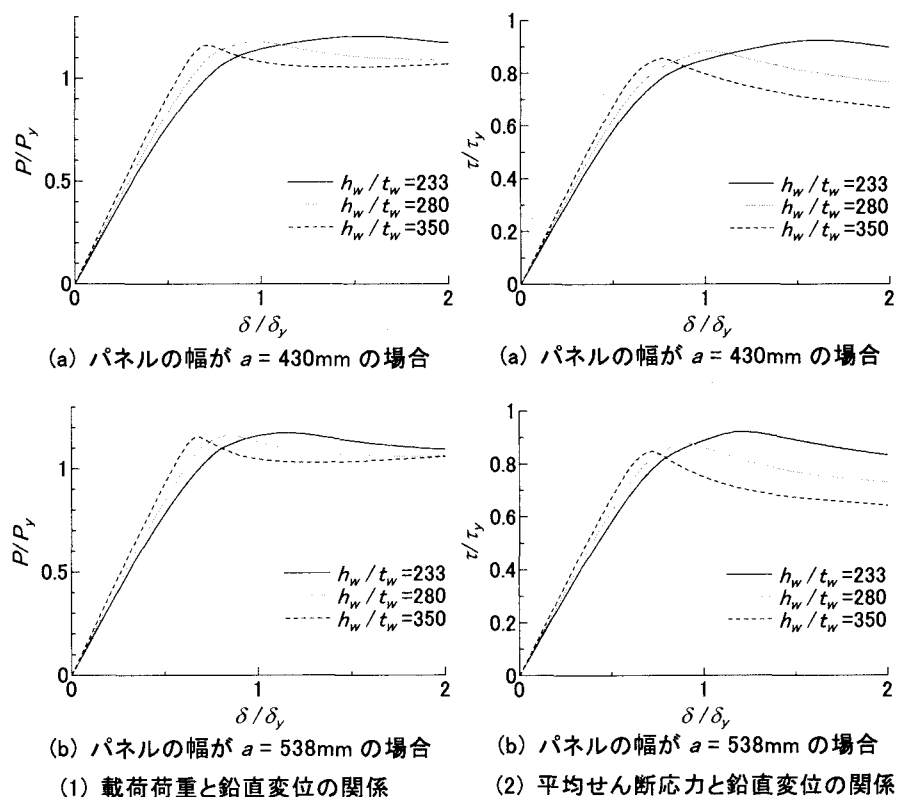


Fig.9 波形腹板の幅厚比の相違による荷重—変位曲線

する。ただし、コンクリート床版内のPC鋼棒の降伏による桁の全体崩壊や非降伏部分の降伏などが起こらないかぎり、腹板ではせん断座屈後の応力再配分が進行する。荷重段階ごとの腹板の面外たわみ分布を図示すれば、Fig.8を得る。載荷直後の変形状態図(a)では、支点反力の

影響を受けて支点直上に設置されている垂直補剛材の両横のパネルが補剛材を節として面外にたわむ。その他の部分では、波形鋼板の波形に沿ってせん断特有の斜張力場が形成される。つぎに、波形腹板がせん断降伏する直前の変形状態を表す図(b)では、支点近傍に生じていた変形が徐々に中央へ移動し、桁の1/4断面近傍に集中するようになる。さらに、最高荷重時の変形状態を表す図(c)では、支点近傍の変形はほとんど目立たなくなり、桁の1/4断面近傍での変形が顕著で、腹板はせん断によって降伏する。最終段階を表す図(d)では、腹板のほぼ全域でせん断特有の斜張力場が形成される。

Table 5 腹板が分担するせん断力

$a(\text{mm})$	h_w/t_w	$P_{\max}/P_y$	$\tau_{\max}/\tau_y$	腹板の分担率
430	233	1.206	0.925	0.767
	280	1.18	0.883	0.748
	350	1.161	0.856	0.737
538	233	1.175	0.921	0.784
	280	1.164	0.879	0.755
	350	1.155	0.848	0.734

3.3 腹板の幅厚比とせん断強度との関係

波形腹板の幅厚比が $h_w/t_w=233$, 280, 350 (腹板厚が12mm, 10mm, 8mm)の桁を対象に、幅厚比とせん断強度との関係を明らかにする。ただし、波形腹板のパネル幅は $a=430\text{mm}$ と $a=538\text{mm}$ 、形状係数は既設橋の実績調査を参考に $\gamma=0.93$ とした。

波形腹板のパネル幅が $a=430\text{mm}$ と $a=538\text{mm}$ に対し、波形腹板の幅厚比が $h_w/t_w=233$, 280, 350の場合の鉛直荷重 P とスパン中央での桁たわみの関係を描けば、Fig.9(1)を得る。図中、 P_y は腹板の降伏せん断力($=A_w\tau_y$)である。同図から明らかなように、合成箱桁の最高荷重はいずれの場合も腹板のみの断面で求めた降伏せん断力 P_y を2割程度上回っている。これには上下コンクリート床版の断面積が関わっている。鋼桁のせん断耐力は、一般に、そのほとんどが腹板で分担される。本研究では、上下フランジが腹板より先に崩壊しないようにするため、合成箱桁の上下コンクリート床版を比較的大きめに設定した。そのため、上下コンクリート床版が分担するせん断力も無視できない。その結果、腹板のみで求めた降伏せん断力に比べて、桁の最高荷重が1.2倍程度になったものと思われる。腹板が厚い場合には、最高荷重後の曲線において、強度の低下があまり起こらない。

桁中央部近傍での腹板の平均せん断応力と桁の鉛直変位の関係を描けば、Fig.9(2)を得る。図から明らかなように、パネル幅が $a=430\text{mm}$ と $a=538\text{mm}$ のいずれの場合も、

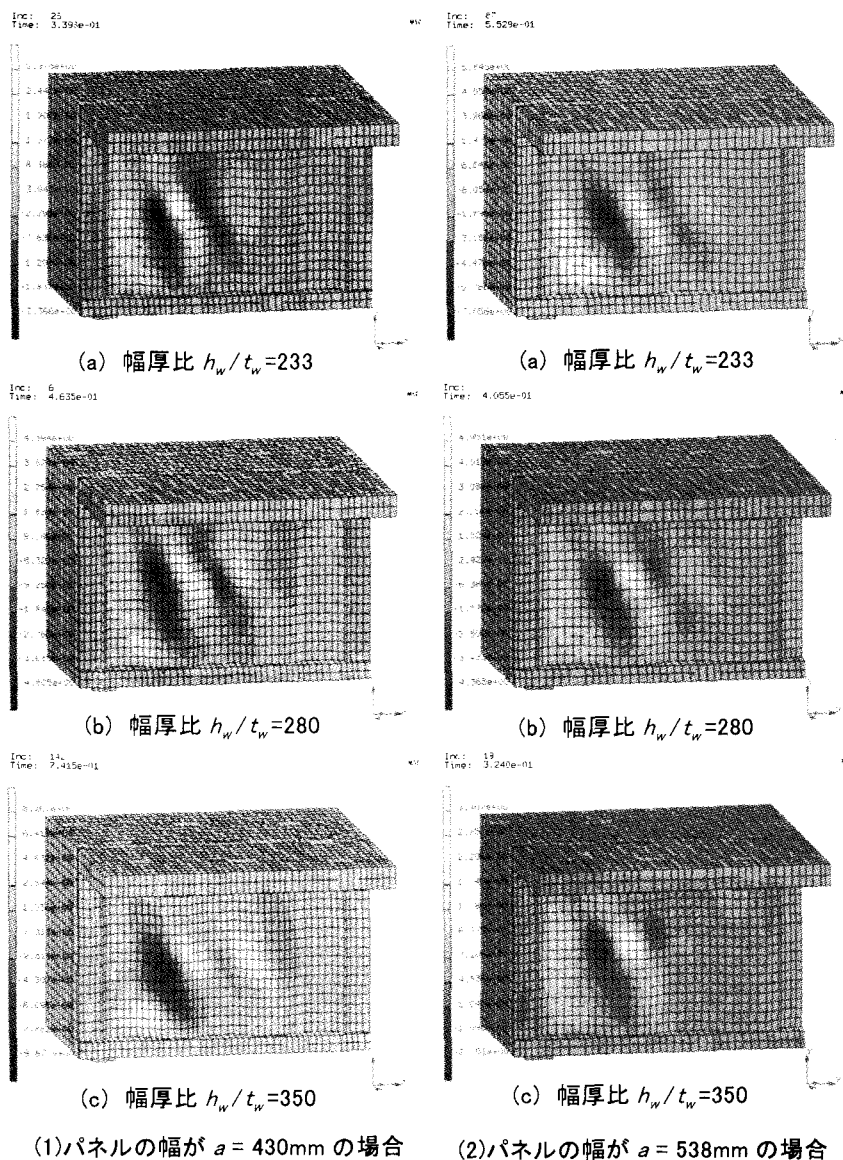


Fig.10 種々の幅厚比に対する最高荷重時の腹板の面外たわみ

幅厚比の増加とともに平均せん断応力は減少し、最高荷重後の強度の低下は著しい。Fig.9(1)の鉛直荷重-鉛直変位関係の場合と比較すれば、幅厚比の違いによる最大平均せん断応力の差違が大きい。

最高荷重 $P_{\max}/P_y$ 、最大平均せん断応力度 $\tau_{\max}/\tau_y$ 、腹板が分担するせん断力と腹板の幅厚比との関係をTable 5にまとめた。同表から明らかなように、腹板が分担するせ

せん断力の割合はいずれのモデルとも75%程度で、約25%のせん断力が上下コンクリート床版によって負担されている。また、腹板の幅厚比の増加とともに腹板が分担するせん断力の割合が減少する。パネル幅が $a=538\text{mm}$ の場合、パネル幅が $a=430\text{mm}$ の場合に比べて、腹板が分担するせん断力の割合が多く、パネルの縦横比もせん断力の分担に影響する。

パネル幅が $a=430\text{mm}$ と $a=538\text{mm}$ の場合に対し、波形腹板の幅厚比を種々変化させ、最高荷重時の腹板の面外たわみ分布を描けば、Fig.10を得る。同図から明らかなように、幅厚比が小さい（腹板が厚い）場合には、面外たわみは桁全体に半波で生じる。

一方、幅厚比が大きい（腹板が薄い）場合には、腹板の面外たわみは折り曲げ加工の影響を受け、狭い範囲に集中する。これは、幅厚比の減少とともに腹板の面外たわみが隣接パネルを横切って生じ、波形腹板の補剛効果が失われるためである。

3.4 波形腹板の形状係数とせん断強度との関係

パネル幅が $a=430\text{mm}$ と $a=538\text{mm}$ に対して、波形腹板の凹凸の程度を表すパラメータすなわち形状係数を $\gamma=0.93, 0.96, 0.98, 0.99$ と変化させ、波形腹板の凹凸が桁のせん断強度に及ぼす影響を明らかにする。ただし、板厚は $t_w=10\text{mm}$ である。

波形腹板の形状係数が桁のせん断強度や腹板の分担するせん断力と鉛直変位との関係を調べれば、Fig.11を得る。Fig.11(1)の(a)図から明らかなように、パネル幅が $a=430\text{mm}$ の場合、一般に用いられる $\gamma=0.93$ より大きいたとえば $\gamma=0.96$ や 0.98 の形状係数の場合でも、その強度は極端に低下しない。しかし、Fig.11(1)の(b)図のパネル幅が $a=538\text{mm}$ の場合、 $a=430\text{mm}$ の場合よりも桁のせん断強度は形状係数の影響を受けやすい。

波形腹板が分担するせん断力を求め、桁中央近傍での平均せん断応力-鉛直変位曲線を描けば、Fig.11(2)を得る。同図から明らかなように、平均せん断応力-鉛直変位曲線は鉛直荷重-鉛直変位曲線と類似の傾向にある。

最高荷重時における $P_{\max}/P_y$ 、最大平均せん断応力 $\tau_{\max}/\tau_y$ 、腹板が分担するせん断力と波形腹板の形状係数との関係をTable 6にまとめた。同表から明らかなように、形状係数の増加とともに、腹板が分担するせん断力が低

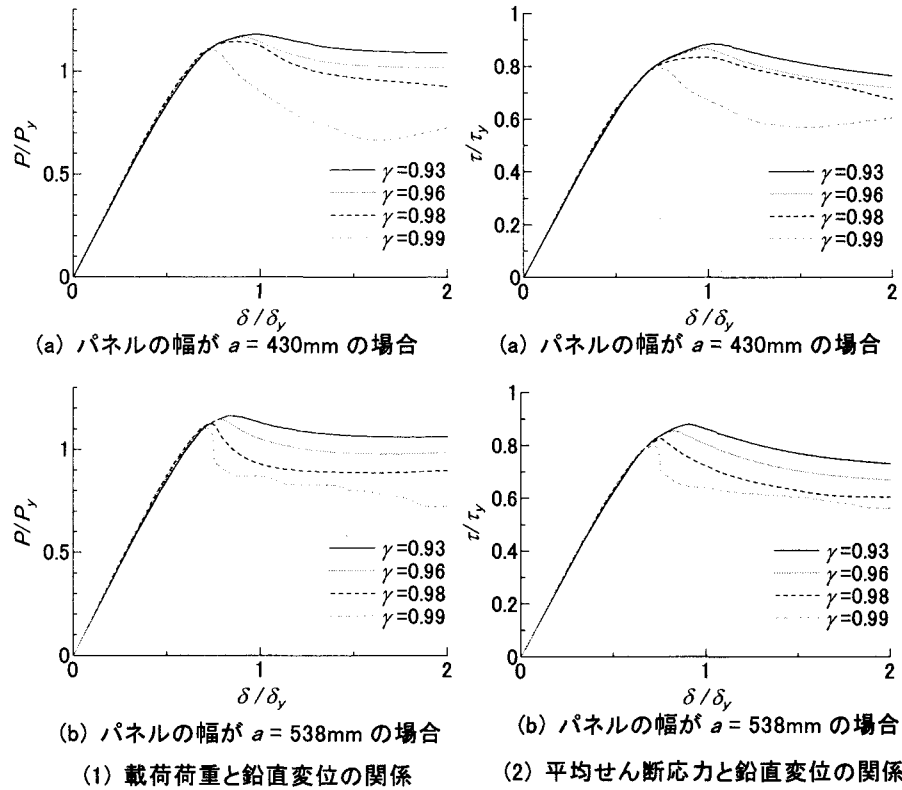


Fig.11 波形腹板における形状係数の相違による荷重-変位曲線

Table 6 腹板が分担するせん断力

$a(\text{mm})$	γ	$P_{\max}/P_y$	$\tau_{\max}/\tau_y$	腹板の分担率
430	0.93	1.18	0.883	0.748
	0.96	1.166	0.867	0.744
	0.98	1.145	0.833	0.727
	0.99	1.104	0.793	0.718
538	0.93	1.164	0.879	0.755
	0.96	1.146	0.854	0.745
	0.98	1.126	0.826	0.733
	0.99	1.103	0.795	0.721

下している。さらに、パネル幅が $a=430\text{mm}$ の場合には形状係数が $\gamma=0.99$ 、パネル幅が $a=538\text{mm}$ の場合には形状係数が $\gamma=0.98$ と 0.99 のときにせん断力の分担率が低下する。これは、形状係数が大きい扁平な板に近づけば、折れ曲げ加工による補剛効果が失われ、凹凸を有する波形腹板が扁平な板の座屈と類似の全体座屈を呈するからである。

形状係数が $\gamma=0.96, 0.98, 0.99$ の場合、パネル幅が $a=430\text{mm}$ と $a=538\text{mm}$ に対して腹板の面外たわみを描けば、Fig.12を得る。同図から明らかなように、両パネル幅の場合とも形状係数が $\gamma=1$ に近づくと、変形が微小な段階で桁は最高荷重に到達し、面外たわみが支点近傍に生じる。また、Fig.8に示したように、初期の荷重段階に支点反力の影響を受けて支点直上の腹板が面外に変形する。これによって、形状係数が $\gamma=0.99$ のような場合には、桁全体に面外たわみが生じる。すなわち、形状係数

が大きい波形腹板では、折板特有の凹凸による補剛効果がほとんど発揮されず、波形腹板は扁平な板と同様のせん断座屈現象を呈する。

3.5 腹板の傾斜角とせん断強度との関係

逆台形合成箱桁橋の腹板には、波形鋼板がしばしば用いられる。逆台形箱桁における波形腹板の座屈強度に関する研究はほとんどなされていない。ここでは逆台形合成箱桁腹板の傾斜を $\theta=50^\circ$ 、 60° 、 70° 、 90° に変化させ、腹板の傾斜角とせん断強度との関係を明らかにする。ここに、腹板厚は $t_w=10\text{mm}$ 、形状係数は $\gamma=0.93$ である。ただし、上下コンクリート床版は腹板の傾斜角に関わらず、同じ断面とした。

鉛直荷重と鉛直変位の関係を求めれば、Fig.13(a)を得る。同図から明らかなように、曲線の弾性域での傾きは腹板の傾斜とともに緩やかになる。これは、腹板の傾斜が緩やかになれば、桁が変形しやすくなることを示している。ただし、最高荷重は腹板の傾きに関わらず変化しない。

つぎに、腹板の傾斜が腹板の分担せん断力に及ぼす影響を明らかにする。桁中央近傍における腹板の平均せん断応力と鉛直変位の関係を描けば、Fig.13(b)を得る。同図から明らかなように、鉛直荷重と鉛直変位の関係と同様、曲線の弾性域での傾きは逆台形の形状が顕著になればなるほど緩くなり、桁は容易に変形する。また、波形腹板が傾斜すれば、その平均せん断応力は減少する傾向にある。これは、腹板の平均せん断応力の減少により、上下コンクリート床版が分担するせん断力の割合が増加することを意味する。

腹板が分担するせん断力をTable 7にまとめた。同表から明らかなように、腹板の傾斜とともに腹板が分担するせん断力が減少する。波形鋼板の特長は波付加工によって高いせん断耐力が確保できる点にある。それゆえ、腹板が分担するせん断力が減少すると、折り曲げ加工の利点が十分に生かせなくなる。

腹板の傾斜角が $\theta=50^\circ$ 、 60° 、 70° の場合に、最高荷重時の腹板の面外たわみを図示すれば、Fig.14を得る。同図から明らかなように、垂直な腹板の場合、腹板の面外たわみは板全体に広がる。一方、腹板が傾斜すれば、面外たわみは下コンクリート床版の近傍に集中する。こ

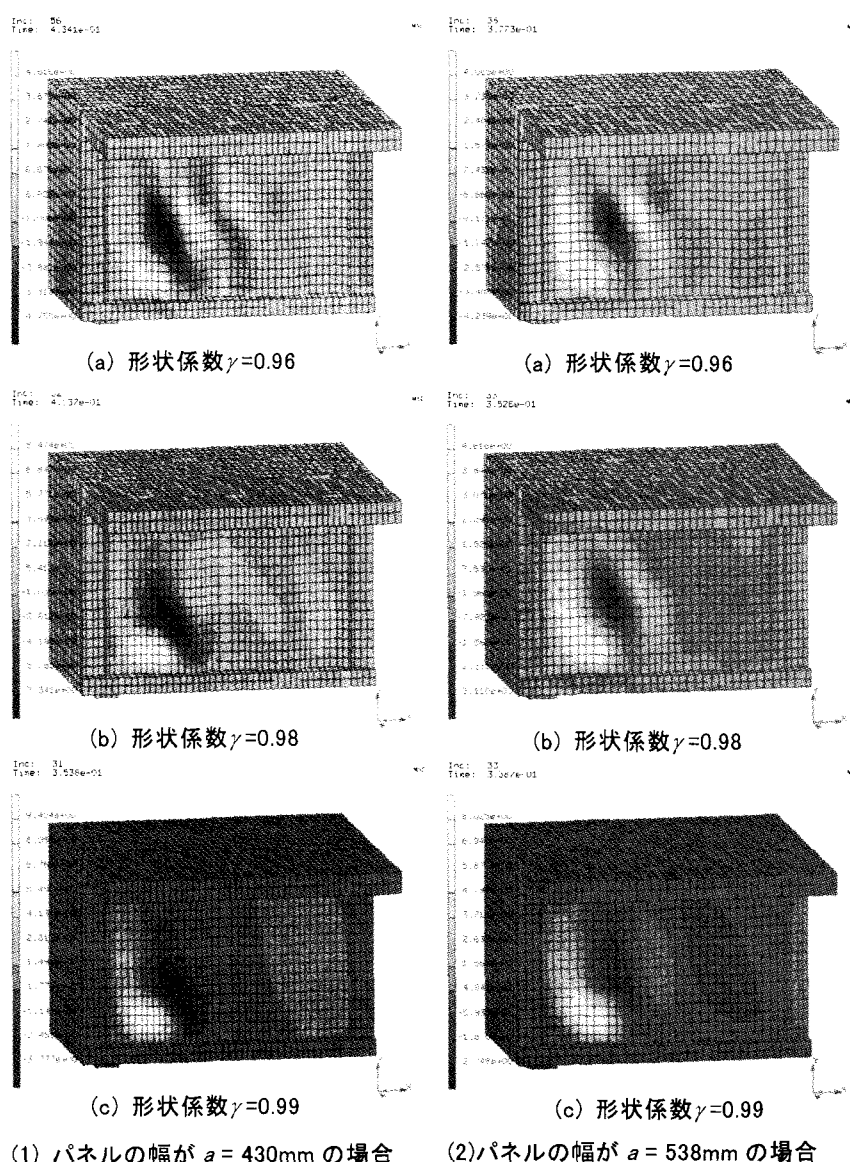


Fig.12 種々の形状係数に対する最高荷重時の腹板の面外たわみ

れは、せん断応力の分布が腹板の傾斜によって変化し、最大せん断応力の発生位置が下方へ移るからである。それゆえ、腹板の傾斜した逆台形合成箱桁に波形鋼板を用いる場合、支点反力とせん断応力分布に注意を要する。

4. あとがき

波形腹板が用いられた長方形および逆台形の合成箱桁における変形と強度を明らかにするため、箱桁をプリ・ポストプロセッサ“MENTAT 2001”によってモデル化し、汎用有限要素解析プログラム“MARC 2001”で弾塑性有限変位解析を行った。解析パラメータに腹板の幅厚比や縦横比、波形鋼板の形状係数、腹板の傾斜を選んだ。解析モデルは、多くの実験桁を参考に決定した。支点と載荷点に垂直補剛材と載荷板を設け、腹板のクリップリングを回避した。解析モデルの離散化として、腹板と垂直補剛材には4節点4辺形厚肉シェル要素、上コン

クリート床版には3次元6面体要素, PC 鋼棒を有する下コンクリート床版には3次元8節点複合要素を用いた。

本研究で得られた結果を要約すれば, つぎのとおりである。

(1) 腹板に波形鋼板が用いられた合成箱桁の変形と強度

“MARC 2001” で得られた腹板の変形を“MENTAT 2001”によって図化した。載荷直後の変形には, 支点反力の影響が現れ, 支点近傍の面外たわみが最大となった。

波形腹板のせん断応力分布は, 桁軸方向の断面位置によって異なる。これは, 下コンクリート床版の降伏によって桁軸方向の曲げモーメントの分布が変化するため, 同様に桁軸方向にせん断力の分布も変化するからである。

(2) 腹板の幅厚比

腹板の幅厚比は, 最高荷重にほとんど影響しない。しかし, 腹板のせん断応力分布から, 腹板の幅厚比がせん断強度(せん断応力分布)に影響することがわかった。パネル幅が広く縦横比の大きい波

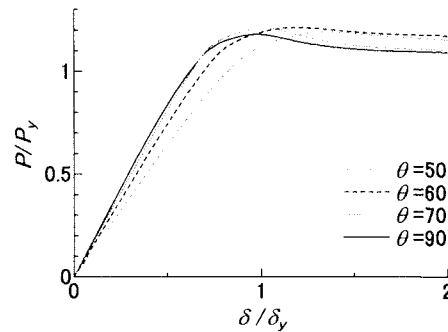
板形状の場合, パネル幅の狭い場合に比べて, 幅厚比の影響を受けやすい。幅厚比が増加するにしたがって, 腹板の面外変形が隣接パネルを横切るようになり, 波形腹板は折板の補剛効果をほとんど発揮せず座屈する。

(3) 波形腹板の形状

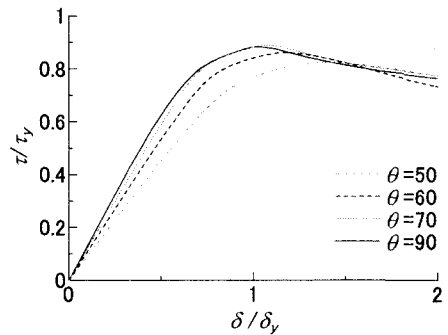
波形腹板の形状を表す形状係数は, 最高荷重やせん断強度に影響を及ぼす。形状係数が 0.98 や 0.99 の扁平な波形腹板は, 平板の座屈性状に類似し, 強度の低下が著しい。形状係数が大きく扁平な波形腹板は, 支点反力の影響を受けて支点近傍の腹板に変形が集中する。

(4) 腹板に波形鋼板が用いられた合成箱桁の傾斜角

桁の荷重-たわみ曲線の傾きは腹板の傾斜とともに緩やかになり, 桁は変形しやすくなる。ただし, 桁の最高荷重は腹板の傾きに関わらずほとんど変わらない。また, 腹板が分担するせん断力は腹板の傾斜とともに低下する。腹板が傾斜するほど, 腹板の面外たわみの発生領域は下床版に近づく。



(a) 載荷荷重と変位の関係

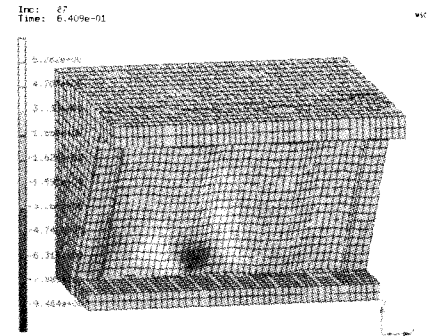


(b) 平均せん断応力と変位の関係

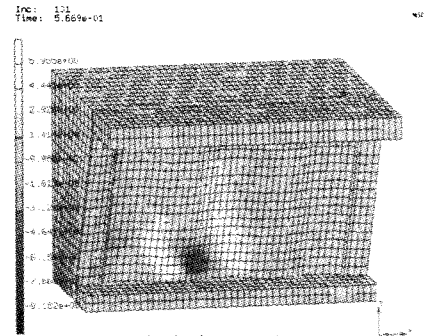
Fig.13 腹板傾斜角の相違による荷重-変位曲線

Table 7 腹板が分担するせん断力

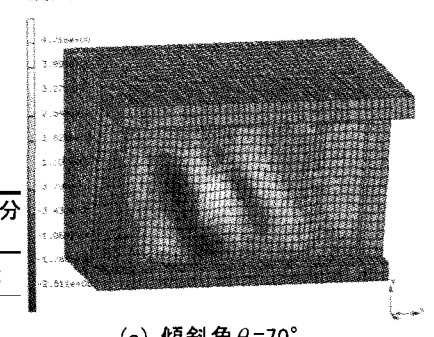
$a(\text{mm})$	傾斜角	$P_{\max}/P_y$	$\tau_{\max}/\tau_y$	腹板の分担率
430	50	1.191	0.825	0.692
	60	1.213	0.870	0.717
	70	1.211	0.890	0.735
	90	1.180	0.883	0.748



(a) 傾斜角 $\theta=50^\circ$



(b) 傾斜角 $\theta=60^\circ$



(c) 傾斜角 $\theta=70^\circ$

Fig.14 腹板の面外たわみ

参考文献

- 1) 島田静雄: Ripple Web Girderによる鋼板のせん断試験, 土木学会論文集, No.124, pp.1-10, 1965-12.
- 2) Easley, J. T. and McFarland, D. E.: Buckling of light-gage corrugated metal shear diaphragms, Journal of the Structural Division, Proc. of ASCE, Vol.95, No.ST7, pp.1497-1516, 1969-7.
- 3) Easley, J. T.: Buckling formulas for corrugated metal shear diaphragms, Journal of the Structural Division, Proc. of ASCE, Vol.101, No.ST7, pp.1403-1417, 1975-7.
- 4) Combault J. (大浦 隆訳): シャロール近くの高架橋, プレストレストコンクリート, Vol.34, No.1, pp.63-71, 1992-1.
- 5) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会編: 波形鋼板ウェブPC橋-計画マニュアル(案)一, 1998-12.
- 6) 上平謙二・立神久雄・本田秀行・園田恵一郎: 波形鋼板を有するPC箱桁橋のせん断およびねじり特性に関する研究, プレストレストコンクリート,

Vol.40, No.3, pp.16-25, 1998-5.

- 7) 山崎正直：波形鋼板ウェブの座屈耐荷力，構造工学論文集，土木学会，Vol.47A，pp.19-26，2001-3.
- 8) 西田 進・長谷川義貴・前川幸次：波形鋼板ウェブPC箱桁橋の弾塑性3次元非線形解析，鋼構造年次論文報告集，日本鋼構造協会，Vol.10，pp.575-581，2002-11.
- 9) 石黒 互・村田嘉宏・須合孝雄：松の木7号橋（銀山御幸橋）の設計と施工，プレストレストコンクリ

ート，プレストレストコンクリート技術協会，Vol.38, No.5, pp.5-14, 1996-9.

- 10) 加藤照己・芦塚憲一郎・加藤卓也・日高重徳：本谷橋（波形鋼板ウェブPC箱桁橋）の設計について，第7回プレストレストコンクリートに関するシンポジウム論文集，プレストレストコンクリート技術協会，pp.747-752，1997-10.

(2004年9月17日受付)