

波形鋼板ウェブのせん断座屈耐力に関するパラメトリック解析

オリエンタル建設株式会社 第二技術部 正会員 ○阿田 芳久
 同 上 正会員 町 勉
 同 上 正会員 正司 明夫
 広島大学 大学院工学研究科 助教授 藤井 堅

1. はじめに

波形鋼板ウェブPC橋は、従来のPC箱桁橋に比べ桁自重を低減することが可能である点や、プレストレスを上下床版に効果的に導入することができる点で非常に合理的であり、近年、施工実績が増えてきている。しかし、波形鋼板の性状に関しては解明されていない問題も残っており、特に波形鋼板ウェブのせん断座屈耐力を正確に評価することが、橋梁全体の安全性を確認する上で重要な課題である¹⁾²⁾。せん断座屈耐力は、一般的に、Easley等の簡易式により求まる弾性座屈強度に非弾性域を考慮した座屈強度の算定式を組み合わせることで照査されている³⁾。しかし、桁高や波形形状が異なる全ての場合について、これら簡易式による検討により正確に現象を評価できるのかどうかの判断が難しく、当面はそれらを別の手法によって補足確認することが必要であると考えられる。そこで本研究においては、FEM解析による複合非線形(材料非線形+幾何学的非線形)解析を行ない、せん断座屈耐力に関する検討を行なった。なお、波形鋼板ウェブにはその製造過程で残留応力や初期不整(初期たわみ)を生じるが、残留応力の分布や初期不整の形状については不明な点が多く、それらがせん断座屈耐力に及ぼす影響については解明されていない。また、実橋においては、自重の軽減や景観上の配慮等から波形鋼板ウェブが傾斜した箱型断面が採用されることもあるが、その傾斜角がせん断座屈強度に及ぼす影響についても明らかではない。これらのことから、残留応力、初期不整、ウェブ配置角度をパラメータとした検討結果について報告する。

2. 検討概要

2.1 概要

本研究においては、日本道路公団により行なわれた波形鋼板ウェブに関する座屈耐力実験²⁾の供試体から、以下に示す2タイプ(供試体A, B)を対象として複合非線形解析を行なった。各供試体とも、せん断座屈が先行するように各寸法が設定されており、また、載荷点および支点部の局部座屈を防ぐために、補剛リブを設置してある。解析には、汎用複合非線形解析プログラム

“DIANA”を用いて、波形鋼板ウェブのせん断座屈耐力に関する各種パラメトリック解析を行なった。

2.2 供試体の諸元と解析条件

(1) 供試体一般図と各種諸元

a. 供試体A

供試体Aの一般図を図-1に、波形鋼板ウェブの諸元を表-1に示す。供試体寸法は、桁長4.400m、桁高

1.238mであり、波形鋼板ウェブ厚3.2mm、フランジプレート厚19mm、補剛リブ厚22mmである。鋼板高hと波高dの比が $h/d=20$ であるが、これはこれまでに実績のある実橋において h/d がほぼ20以下であることから設定されたものである。この場合、波高dが十分に大きく面外方向の剛性が高いため、非弾性域で座屈す

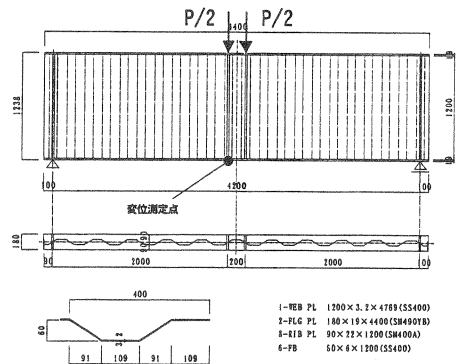


図-1 一般図(供試体A)

表-1 波形鋼板諸元(供試体A)

波高 d [mm]	60
鋼板高 h [mm]	1200
波長 l [mm]	400
材質	SS400

するという実験結果が得られた²⁾。よって、幾何学的非線形の影響が小さく、材料非線形の影響が支配的な供試体であるといえる。

b. 供試体 B

供試体 B の一般図を図-2 に、波形鋼板ウェブの諸元を表-2 に示す。供試体寸法は、桁長 4.400m、桁高 2.138m であり、波形鋼板ウェブ厚 3.2mm、フランジプレート厚 19mm、補剛リブ厚 22mm である。鋼板高 h と波高 d の比が $h/d=105$ であり、これまでの実績と比較してかなり大きな比率となっている。これは、今後、より長支間の橋梁に波形鋼板ウェブが採用される場合に桁高が高くなることを想定して設定されたものである。この供試体の場合、波高 d が小さく面外方向の剛性が低いため、弾性域で座屈するという実験結果が得られた²⁾。よって、幾何学的非線形の影響が支配的で、材料非線形の影響が小さい供試体であるといえる。

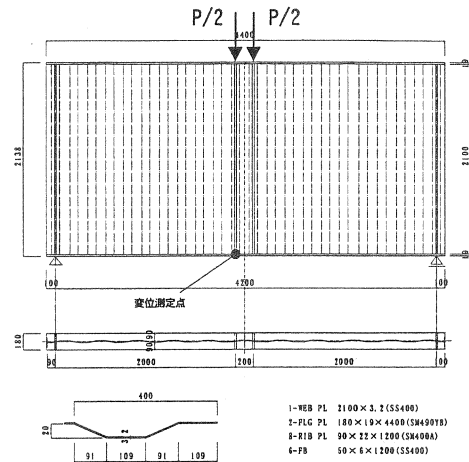


図-2 一般図(供試体 B)

表-2 波形鋼板諸元(供試体 B)

波高 d [mm]	20
鋼板高 h [mm]	2100
波長 l [mm]	400
材質	SS400

(2) 解析モデルのパラメータ設定

本研究においては、パラメータとして、残留応力、初期不整、ウェブ配置角度に着目し解析を行った。作成した解析モデルに関する各種パラメータの組合せを、表-3 に示す。また、以下にそれらの概要を示す。

表-3 解析モデルのパラメータ設定

解析モデル		残留応力		初期不整		ウェブ配置			備考
		従来型分布	広大型分布	外側に变形	内側に变形	鉛直に配置	斜め配置 65.556°	斜め配置 45°	
供試体 A	[A-1]	-	-	-	-	○	-	-	基本モデル
	[A-2]	○	-	-	-	○	-	-	残留応力モデル①
	[A-3]	-	○	-	-	○	-	-	残留応力モデル②
	[A-4]	-	-	○	-	○	-	-	初期不整モデル①
	[A-5]	-	-	-	○	○	-	-	初期不整モデル②
	[A-6]	-	-	-	-	-	○	-	ウェブ斜め配置モデル①
	[A-7]	-	-	-	-	-	-	○	ウェブ斜め配置モデル②
供試体 B	[B-1]	-	-	-	-	○	-	-	基本モデル
	[B-2]	-	-	○	-	○	-	-	初期不整モデル①
	[B-3]	-	-	-	○	○	-	-	初期不整モデル②

a. 残留応力

残留応力は、外力が作用していない状態においても物体内に残存する応力である。波形鋼板ウェブの場合、その製作工程において、冷間曲げ加工による波付けの工程や、フランジプレート等を溶接する工程が存在す

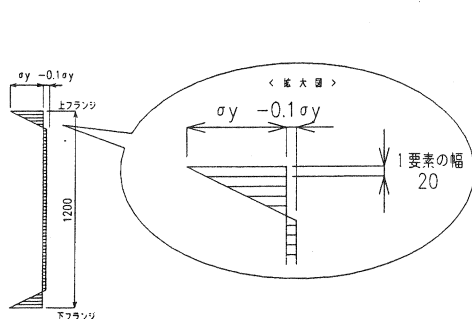


図-3 残留応力分布① (従来型)

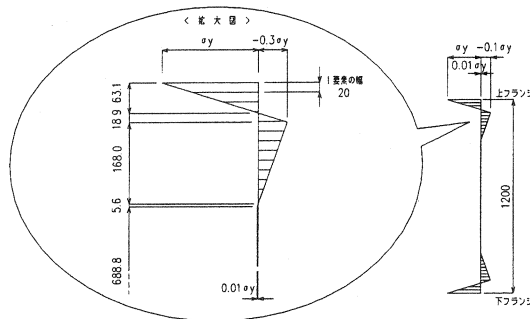


図-4 残留応力分布② (広島大学型)

るが、その際、部材中に残留応力を生じることは避けられない。この状態でさらに外力が作用した場合、外力による応力が残留応力に付加されることになるため、終局強度が低下する⁹⁾。そこで、本研究では、図-3, 4 に示す残留応力分布を仮定し、解析モデルに初期応力として導入した。図-3 は従来よりプレートガーダーの設計において用いられている残留応力分布であり、図-4 は波形鋼板ウェブに関して広島大学により実測された残留応力分布⁹⁾をもとに単純化して仮定したものである。両者とも、圧縮と引張の釣合いが取れるように分布幅を決定している。なお、板厚方向への残留応力変化は考えない。

b. 初期不整

初期不整は、残留応力と同様に、冷間曲げ加工や溶接等の製作工程中に生じる。初期不整を生じている部材は、終局耐力が小さくなることが知られており⁹⁾、また一般に残留応力の影響と重なり合うことから、座屈強度に不利な影響を及ぼす因子として検討が必要であると考えられる。そこで、本研究においては、図-5 に示す2通りの初期不整形を仮定して解析を行った。柱部材の場合

などには変形状を1次の正弦波で仮定する 경우가多いが⁹⁾、ここでは簡易的に、断面・平面ともに変形状を放物線で仮定した。なお、全解析モデルにおいて、初期不整値 y の最大値は軸方向パネルの中心でかつ桁高中心の位置において3.5mmとした。これは供試体Bにおいて実測された最大値より決定した値である。初期不整の実測値にはバラツキがあり、そのまま導入するのは煩雑であるため、一般的な手法として、最も不利になる初期たわみ量を基準値として解析に導入した。

c. ウェブ配置角度

ウェブが斜めに配置されることによる影響について検討するために、図-6 に示すような2通りの配置角度を設定した。なお、対象モデルは供試体Aとし、鋼板の寸法はそのままで斜めに配置した。

(3) 解析条件

複合非線形解析において設定した解析条件を、表-4 に示す。また、各供試体のFEM解析モデルと材料非線形解

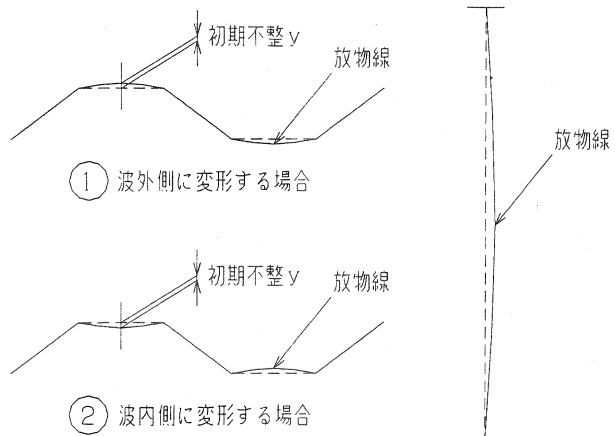


図-5 初期不整入力設定

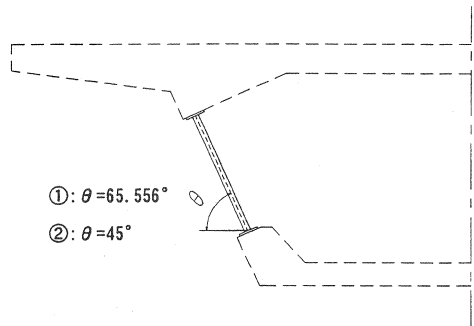


図-6 ウェブ設定角度

表-4 解析条件

使用要素	波形鋼板ウェブ	要素種類	4 節点シェル要素
		要素特性	非線形要素
		DIANA要素名	Q2OSH
積分点		面内	2×2=4点
		板厚方向	5層
使用要素	フランジプレート 補剛リブ	要素種類	4 節点シェル要素
		要素特性	弾性要素
		DIANA要素名	Q2OSH
積分点		面内	2×2=4点
		板厚方向	5層
解析仕様		応力評価点	積分点
		荷重制御法	強制変位
		求解法	Newton Regular法
		収束判定法	残差エネルギー
		幾何学的非線形解析手法	Total Lagrange法
材料非線形	応力-ひずみ曲線	ウェブ	マルチリニア型
		降伏基準	von Mises型

析において設定した応力-ひずみ曲線を図-7~10に示す。これらの解析モデルは、供試体の支間中央から片側半分のみとし、横倒れ座屈が起きないようにフランジプレート位置において面外変形を拘束した。荷重の荷重方法は、荷重荷重位置に段階的に強制変位を与える方法とし、それにより得られた荷重-変位の関係をまとめた。求解法は、最も代表的な手法のひとつである Newton Regular 法を用いた。この他にも様々な求解法を選定することが可能であり、解析時間を短縮する

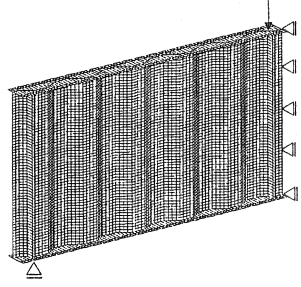


図-7 FEM解析モデル(供試体A)

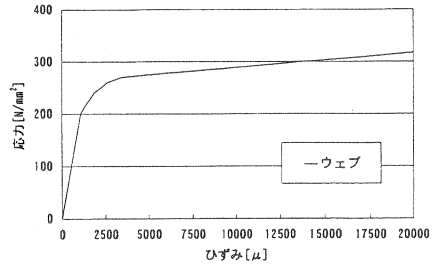


図-8 応力-ひずみ曲線(供試体A)

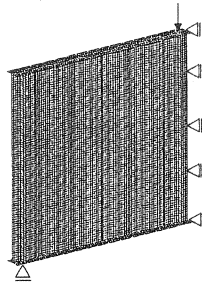


図-9 FEM解析モデル(供試体B)

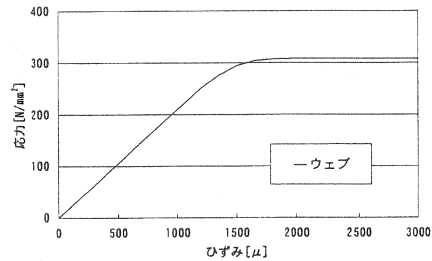


図-10 応力-ひずみ曲線(供試体B)

る目的で Newton Modify 法等も一般的に用いられるが、解が発散しやすい等の問題があるためその適用には慎重を要する。幾何学的非線形解析の解析手法には Total Lagrange 法を用いた。これは、ある段階での変形状態を求めるのに、常に変形前の初期状態を参照形状とする手法である。この他に、1段階前の状態を参照形状とする Updated Lagrange 法による解析も可能である⁴⁰⁾。材料非線形解析における降伏基準は、von Mises 型によるものとした。これは、垂直応力度 σ とせん断応力度 τ とを組合せた合成効果の照査に適用され、鋼橋において一般的に用いられている。

3. 解析結果

3.1 残留応力分布形状の違いによる影響

解析モデル[A-1], [A-2], [A-3]に関して行なった解析結果を図-11に示す。残留応力を考慮した[A-2], [A-3]は基本モデル[A-1]と比較して降伏時の変形量が5%程度少ないものの、各モデルとも最大荷重は概ね一致している。このことから、残留応力がせん断座屈耐力に及ぼす影響は小さいと考えられる。

3.2 初期不整の向きによる影響

(1) 弾性座屈

解析モデル[B-1], [B-2], [B-3]に関して行なった解析結果を図-12に示す。供試体Bは波高dが

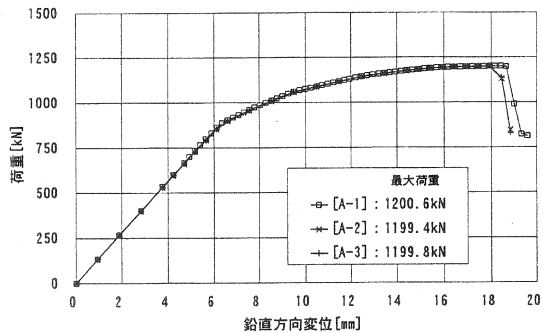


図-11 荷重-鉛直方向変位曲線

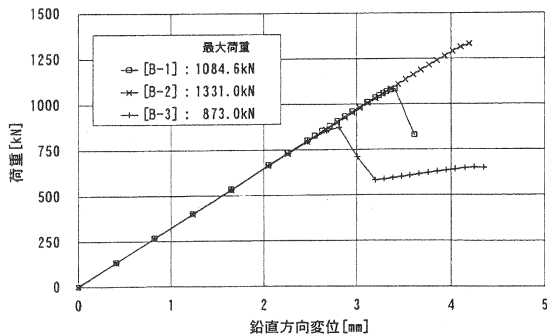


図-12 荷重-鉛直方向変位曲線

鋼板高 h と比較して小さく、面外方向の剛性が低いため、急激に破壊に至る弾性座屈の性状を示す。図-12によると、初期不整により波外側に变形している[B-2]は基本モデル[B-1]よりもせん断座屈耐力が20%程度増加し、波内側に变形している[B-3]は基本モデル[B-1]よりもせん断座屈耐力が20%程度減少するという結果であった。つまり、鋼板高 h に対して波高 d が小さい場合、初期不整が面外方向の剛性に大きな影響を与える可能性があるため、せん断座屈耐力を検討する際には、初期不整を適切に評価する必要があると考えられる。

(2)非弾性座屈

解析モデル[A-1], [A-4], [A-5]に関して行なった解析結果を図-13に示す。供試体Aは波高 d が鋼板高 h と比較して大きく、面外方向の剛性が高いため、せん断に対して非弾性座屈の性状を示す。図-13によると、降伏時の変位量に多少の差は見られるものの、各モデルとも最大荷重に大きな差は見られなかった。これは、波高 d の60mmに対し、初期不整値の最大値3.5mmが十分に小さいために、せん断座屈耐力に対する初期不整の影響が小さくなったものと考えられる。

3.3 ウェブ傾斜角の影響

解析モデル[A-1],[A-6],[A-7]に関して行なった解析結果を図-14に示す。ウェブの配置角度 θ が小さくなるほど、座屈耐力の低下が見られた。この結果をもとに次のように考えることができる。鉛直の部材が角度 θ だけ傾くことで、せん断剛性は $GA = G \cdot \sin^3 \theta \cdot A$ となり、 $\sin^3 \theta$ 倍に低下する。今回の解析では波形鋼板ウェブの実高さは変化させておらず、傾斜角 θ 分だけ鉛直高さは低くなるため、剛性は $1/\sin \theta$ 倍に増加することになる。したがって、傾斜角 θ を有する波形鋼板ウェブの剛性は、実高さが同じの場合 $\sin^3 \theta / \sin \theta$

$= \sin^2 \theta$ 倍だけ低下することになる。このことは、表-5によって確認される。また、傾斜角 θ を有する波形鋼板の座屈耐力は、投影面積(鉛直高 \times 板厚)で検討

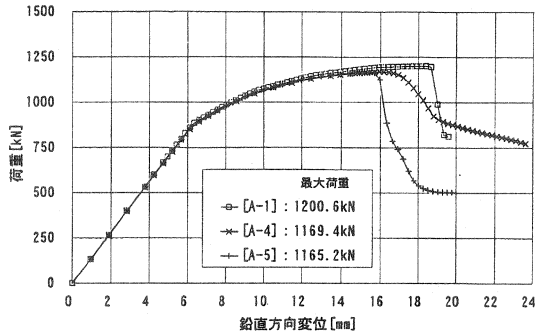


図-13 荷重-鉛直方向変位曲線

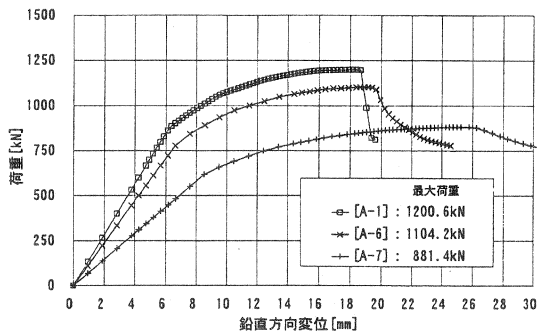


図-14 荷重-鉛直方向変位曲線

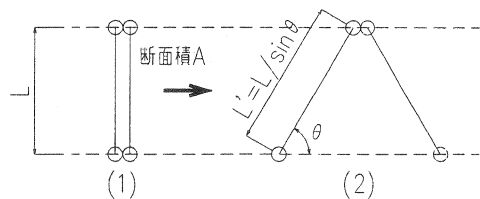


図-15 概念図

表-5 最大荷重および剛性の比較

		ウェブ傾斜角度 [°]	① 最大荷重 [kN]	$\sin \theta$	②基本モデルの最大荷重 $\times \sin \theta$ [kN]	②/①	
基本モデル		[A-1]	90	1200.6	1.00000	1200.6	-----
ウェブ斜め配置モデル①		[A-6]	65.556	1104.2	0.91037	1093.0	0.99
ウェブ斜め配置モデル②		[A-7]	45	881.4	0.70711	849.0	0.96
		ウェブ傾斜角度 [°]	③ 剛性 [kN/mm ²]	$\sin^2 \theta$	④基本モデルの剛性 $\times \sin^2 \theta$ [kN]	④/③	
基本モデル		[A-1]	90	141.8	1.00000	141.8	-----
ウェブ斜め配置モデル①		[A-6]	65.556	118.3	0.82877	117.5	0.99
ウェブ斜め配置モデル②		[A-7]	45	73.0	0.50000	70.9	0.97

し、 $\sin \theta$ 倍の低下を見込めばよい。

4. まとめ

以上の検討により、波形鋼板ウェブのせん断座屈耐力に関して以下のことが分かった。

- 1) 残留応力がせん断座屈耐力に対して与える影響は小さく、一般的な照査においては考慮する必要はないものと考えられる。
- 2) 鋼板高 h と比較して波高 d が十分に大きければ、初期不整がせん断座屈耐力に対して与える影響は小さく、一般的な照査においては考慮する必要はないものと考えられる。ただし、鋼板高 h と比較して波高 d が小さい場合には、弾性座屈の性状を示すとともに、初期不整がせん断座屈耐力に対して与える影響も大きくなる。特に、初期不整の向きが波形状の内側に変形する場合に、面外方向の剛性が低くなることから、せん断座屈耐力が低くなり危険側となる。
- 3) 波形鋼板ウェブを傾斜角 θ で配置する場合、せん断座屈耐力の検討においては、投影面積 (鉛直高さ \times 板厚) により得られた値に $\sin \theta$ 倍の低下を見込めばよい。また同様に、せん断剛性に関しては $\sin^2 \theta$ 倍の低下を見込めばよい。
- 4) 波形鋼板ウェブ単体のせん断座屈耐力に関しては、複合非線形解析を行なうことでその性状を比較的正確に把握できると考えられる。しかし、コンクリート床版を有する複合構造の場合、複合非線形解析を適用するには、さらに高度な工学的判断が要求される。それは、鋼部材と比較してコンクリート部材は材料が不均一であることから、材料非線形解析を行なう場合に必要となる応力-ひずみ関係の構成則を決定することが難しいことによる。コンクリート部材は圧縮域と引張域とで異なる非線形性を有しており、さらに、ひび割れの分布やひび割れ後の特性をどのように考慮するのかといった様々な問題があるため、各種条件の設定に慎重を要することとなる。今後の課題としては、コンクリート部材の非線形性も考慮した複合非線形解析の手法を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 角谷務, 青木圭一, 富本信, 狩野正人: 波形鋼板ウェブのせん断耐力評価, プレストレストコンクリート, Vol.43, No.1, Jan.2001
- 2) 財団法人 高速道路技術センター: 平成12年度 波形鋼板ウェブを有する鋼コンクリート複合構造橋梁の長支間化に伴う技術検討 報告書 (日本道路公団 九州支社委託), 平成13年3月
- 3) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会: 波形鋼板ウェブPC橋計画マニュアル (案), 平成10年12月
- 4) 中井博, 北田俊行: 鋼橋設計の基礎, 共立出版株式会社, 1992年5月20日
- 5) 藤村伸智, 藤井堅, 町勉, 松岡敬: 波形鋼板ウェブの残留応力, 第56回土木学会年次学術講演会, 2001.9
- 6) 土木学会: 構造工学シリーズ7 構造工学における計算力学の基礎と応用, 丸善(株), 平成8年12月1日
- 7) DIANA User's Manual Release7: TNO Building and Construction Research, 1998.8