

## 複合非線形解析による波形鋼板ウェブのせん断座屈耐力評価

日本道路公団 中部支社 池田 博之  
 日本道路公団 技術部 芦塚 憲一郎  
 鹿島 土木設計本部 正会員 山野辺 慎一  
 鹿島 技術研究所 ○一宮 利通

### 1. はじめに

従来のプレストレストコンクリート箱桁の軽量化を図るため、ウェブに波形鋼板を用いた複合形式の主桁がフランスで実用化され、近年、国内においても適用されている。これまでの波形鋼板ウェブのPC箱桁橋は適用支間が80m程度と比較的中規模であり、波形鋼板ウェブのせん断座屈が設計上支配的となることは少なかった。桁高が大きく座屈が問題となる場合は、コンクリートを裏打ちすることにより座屈に対する安全性を確保してきた。しかし、今後の支間の長大化に伴い、大断面の桁を合理的に設計するには、せん断座屈の評価精度を向上させる必要がある。そこで、材料非線形性と幾何学的非線形性の両者を考慮した解析(複合非線形解析)を用いて、波形鋼板ウェブのせん断座屈挙動を評価するための検討が行われている<sup>1)</sup>。ここでは、せん断降伏が先行する場合および非弾性域で座屈する場合の検討がなされている。本検討では、幾何学的非線形性の影響が卓越する場合の検討を実施したので、その結果を報告する。

### 2. 解析方法と試験体の選定

波形鋼板ウェブのせん断座屈の評価に対しては、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した3次元有限要素解析が必要となる。本検討では、複合非線形解析プログラム「SLAP」<sup>2)</sup>を用いることとした。

表-1に示すNo.1-1とNo.1-2の既往の試験体<sup>3)</sup>について、シミュレーション解析を行い、鋼板の応力-ひずみ関係の影響(バイリニアモデルまたは明確な降伏点を持たないマルチリニアモデル)、初期不整の影響(実測による初期形状を考慮または非考慮)、および溶接による残留応力の影響(楔形分布を考慮または残留応力なし)について検討した。その結果、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した有限要素法プログラムにより座屈荷重が精度良く解析できること、荷重-変位曲線は鋼板の応力-ひずみ関係に大きく影響されること、フランジとウェブの接合部に楔形の溶接残留応

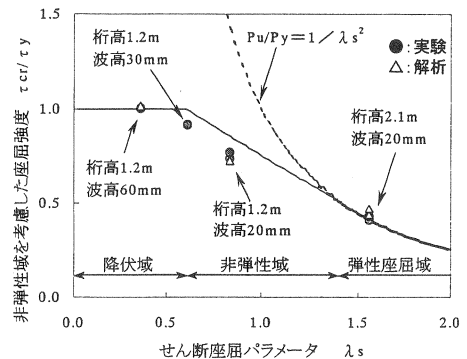


図-1 非弾性を考慮した座屈強度

表-1 試験体諸元と実験・解析結果

	ウェブ高 (mm)	板厚 (mm)	波長 (mm)	波高 (mm)	実験による 座屈荷重(kN)	解析による座屈荷重(kN)	
						初期不整あり	初期不整なし
No.1-1 <sup>2)</sup>	1200	3.2	400	20	907	894	911
No.1-2 <sup>2)</sup>				60	1153	1172	1229
No.2-1	2100	3.2	400	20	998	1003	1085
No.2-2					941	1020	
No.2-3					995	1087	

力分布を仮定した場合には座屈荷重に与える影響は小さいこと、並びに、初期不整は面外変形挙動および座屈モードに与える影響が大きいことが分かった。

既往の試験体諸元がせん断降伏あるいは弾性座屈のどのような領域にあるかを示したのが図-1である。桁高 1.2m で波高 20mm の試験体は非弾性域で座屈し、同波高 60mm の試験体はせん断降伏が先行した後に座屈する諸元を有している。なお、波高 60mm は実橋と同程度の位置にある。

桁高と波高をパラメータとして解析を行った結果を図-2に示す。桁高 1.2m 波高 60mm の試験体は複合非線形解析と材料非線形性のみを考慮した解析が同じ軌跡をたどり、降伏後荷重がほぼ一定になってから座屈していることから、材料非線形性の影響が卓越していることが分かる。桁高 2.1m 波高 20mm の試験体は、その逆で、材料非線形性の影響が現れる前に座屈しており、幾何学的非線形性の影響が卓越していることが分かる。桁高 1.2m 波高 20mm の試験体は材料非線形性の影響が現れてまもなく座屈しており、中間的な挙動を示している。解析方法の妥当性の確認としては、幾何学的非線形性の強い領域において妥当性を確認することが重要であると考え、試験体の諸元を支間長 4.2m、桁高 2.1m、波高 20mm、波長 400mm、板厚 3.2mm とした。図-3に試験体の形状を示す。

### 3. 座屈実験とシミュレーション解析

実験は、図-4に示すように、単純支持した試験体の

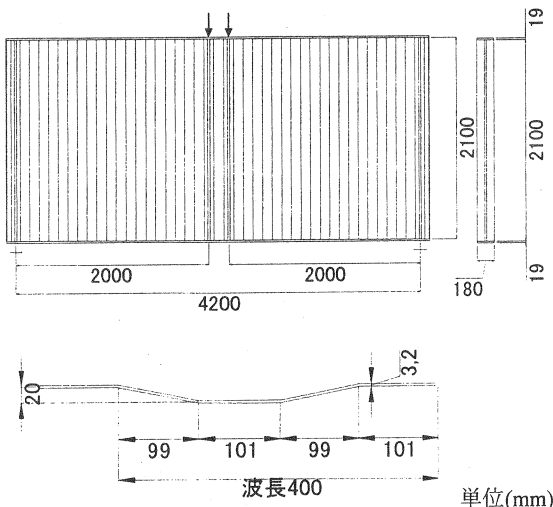
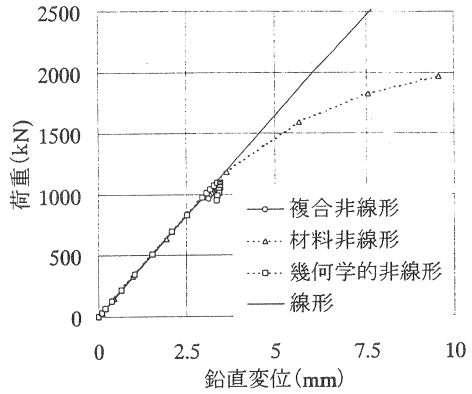
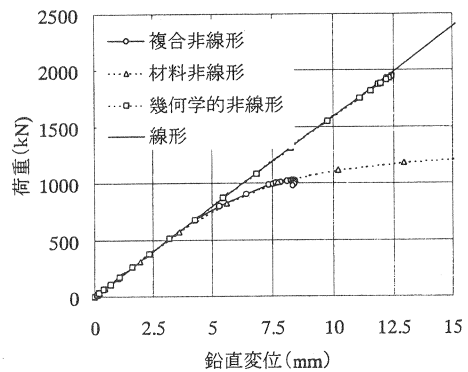


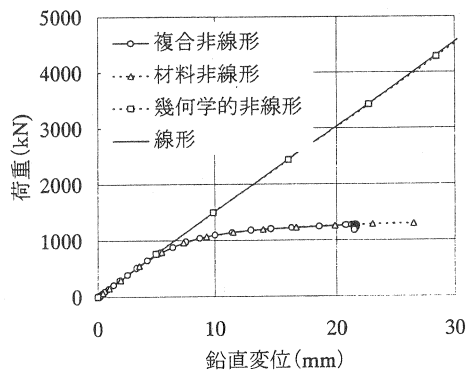
図-3 試験体の形状



(a) 桁高 2100mm, 波高 20mm



(b) 桁高 1200mm, 波高 20mm



(c) 桁高 1200mm, 波高 60mm

図-2 桁高と波高をパラメータとした解析による荷重-鉛直変位関係

支間中央を油圧ジャッキにより荷重して行った。試験体のウェブには、面外の変形を計測するために変位計を設置した。初期形状は、試験体の支間方向と平行なパネルにおいて、高さ方向に 150mm ピッチで、パネルの中心から 20mm ずつ離れた 2 点で計測した。試験体全体で 600 箇所の点で形状を計測し、解析モデルの初期形状として実測値を入力した。また、要素分割は、水平方向には折り目と折り目の間を 4 分割し、鉛直方向にはほぼ正方形メッシュとなるよう 86 分割(17325 節点、17076 要素)とした。試験体を製作した鋼板と同じロットから採取したテストピースを用いた材料試験結果と解析モデルの応力-ひずみ曲線を図-5 に示す。解析モデルは、材料特性を精度良く再現するために、マルチリニアモデルとした。

表-1 に座屈荷重の解析値と実験値を、図-6 に荷重と鉛直変位の関係を示す。解析値は実験値の±10% 以内にあり、十分な精度で予測可能であることが確認できた。荷重-鉛直変位関係については、初期形状を考慮することにより若干精度よく解析できるが、その差は小さかった。また、No.2-3 については、座屈後も荷重を継続したが、座屈後の強度は最大座屈耐力の 8 割程度あることが確認された。

図-7 に荷重と面外変位の関係を、図-8 に面外変位分布を示す。荷重-面外変位関係と面外変位分布については、試験体の初期形状を忠実に考慮することで、座屈を支配する面外変形を精度よく解析できることが確認された。

図-9 に解析による最大荷重時の面外変形図を、写真-1 に実験による座屈状況を示す。試験体は板厚が薄いために製作精度が悪いと局所的な座屈となることが知られているが、本試験体の座屈は片側全体にわたる全体座屈を呈していた。また、これは解析による変形状況とも概ね一致していた。

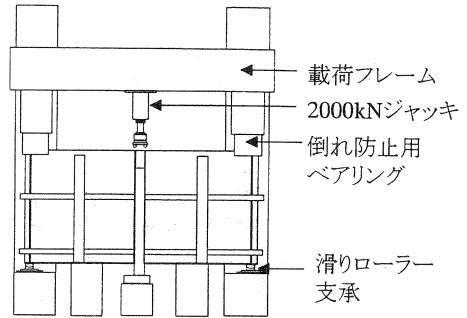


図-4 荷重方法

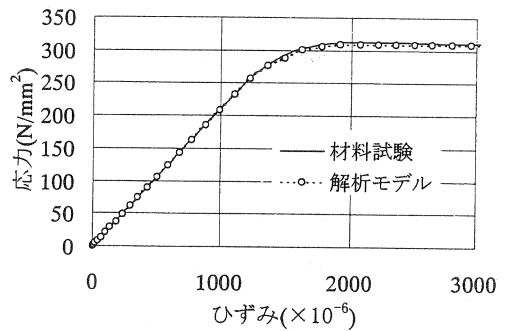
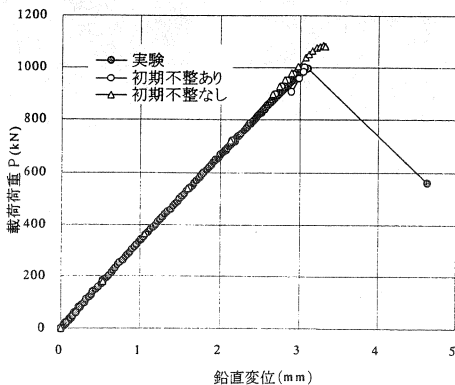
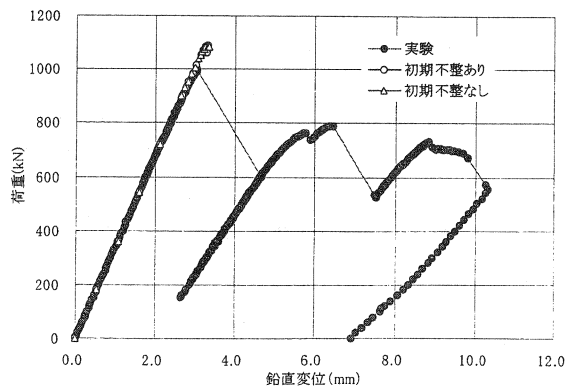


図-5 ウェブ鋼板の応力ひずみ曲線



(a)No.2-1 試験体



(b)No.2-3 試験体

図-6 荷重-鉛直変位関係の例

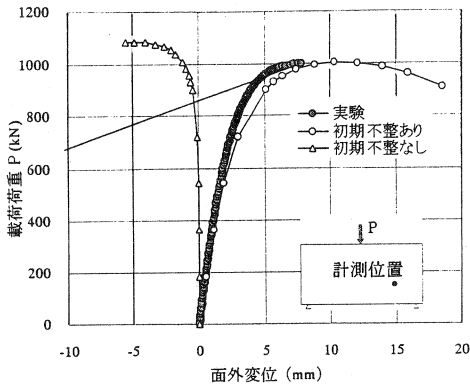


図-7 荷重-面外変位関係 (No.2-1 試験体)

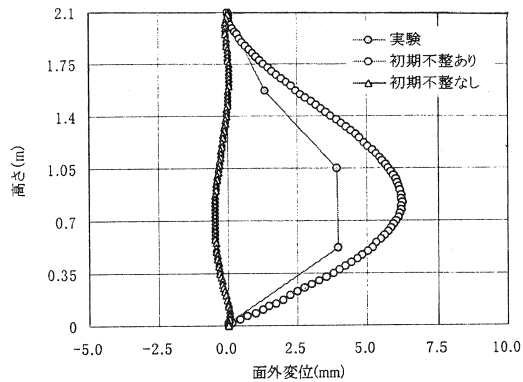


図-8 面外変位分布 (No.2-1 試験体)

#### 4. まとめ

本検討で実施した実験と解析から、以下の知見が得られた。

- ①これまでの実橋に比べ幾何学的非線形性の影響がはるかに強い領域においても、せん断座屈耐力や荷重と変形の関係を十分な精度で解析できることが確かめられ、解析手法の妥当性が確認できた。
- ②初期不整の有無による解析を比較した結果、座屈荷重と荷重-鉛直変位関係に対しては、初期不整を考慮した解析の方がより精度良く解析できることが分かった。ただし、その差異は小さい。
- ③面外変形挙動には初期不整が大きく影響している。

なお、本検討では支間方向と平行なパネル部で600箇所の初期形状を測定したが、こうした初期不整の評価方法では面外変形挙動や歪分布に対する全体的な解析精度を改善できるものの、実際の初期不整を全て考慮するには不十分であると考えられる。今後、設計においてどのように初期不整を設定するかについて検討する必要があると考えられる。

#### 5. おわりに

本検討は、(財)高速道路技術センターの「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」(委員長:渡辺英一京都大学教授)の指導のもとに行われたものである。ご指導頂いた方々に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1)高速道路技術センター: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、平成11年度報告書
- 2)沖見他:複合非線形フレーム解析システムの開発、土木学会誌、Vol.80、1995

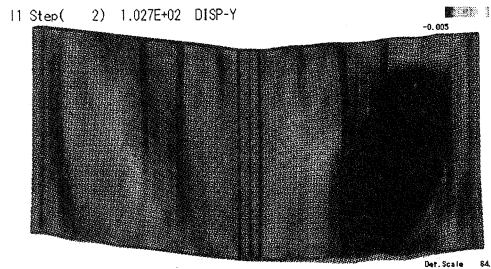


図-9 最大荷重時変形図 (No.2-1 試験体)

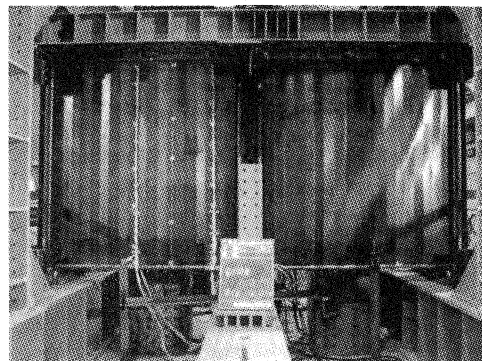


写真-1 座屈状況 (No.2-1 試験体)