

コンクリート床版付き波形鋼板ウェブ桁の非線形挙動に関する検討 (その1) 単純梁

大成建設 (株) 技術センター ○小尾 博俊
 大成建設 (株) 技術センター 坂下 克之
 大成建設 (株) 技術センター 加納 宏一
 大成建設 (株) 土木設計第1部 正会員 白谷 宏司

1. はじめに

波形鋼板ウェブ PC 橋の普及に伴い、波形鋼板ウェブのせん断挙動に関する検討はこれまで数多く行われている。特に近年は、鋼材の材料非線形性や幾何学的非線形性を考慮した FEM 解析^{1) 2)}によって、波形鋼板ウェブのせん断座屈時の挙動、特にウェブ鋼板の初期面外変形・溶接部残留応力がせん断強度に及ぼす影響などは、ほぼ解明されている。

しかし、連続桁などの大型の実橋で想定される終局荷重時には、せん断力と同時に大きな曲げモーメントも発生するため、コンクリート床版には曲げクラックが生じているケースが一般的と考えられるが、これまで、波形鋼板ウェブ PC 橋のコンクリート床版が非線形領域に達した状態までを想定した解析的検討事例は無い。

そこで、本検討では、せん断力が卓越する RC 床版付きの波形鋼板ウェブ桁を対象とし、非線形 FEM 解析手法の妥当性を、模型実験結果との比較に基づき検証する。また、同一波形ウェブ諸元でコンクリート床版の有無の2ケースについて終局状態の相違を比較することにより、コンクリート床版がウェブの座屈耐力に及ぼす影響についても、若干の検討を加える。

2. 実験概要

本検討においては、コンクリート床版なし (ケース1) およびコンクリート床版付き (ケース2) の波形鋼板ウェブ桁の単純梁を対象とした模型実験を実施した。試験体の概要を図-1 に示す。

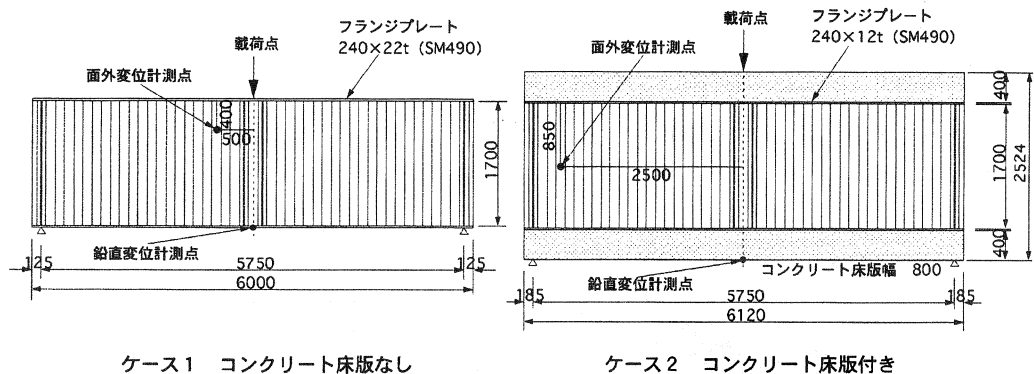


図-1 試験体概要

波形鋼板の仕様はケース1とケース2で同一とし、波形形状、板厚、ウェブ高は、せん断座屈パラメータ³⁾が、局部・全体座屈の両者に対してほぼ 0.6 になるように設定した。波形鋼板の仕様を図-2 に示す。

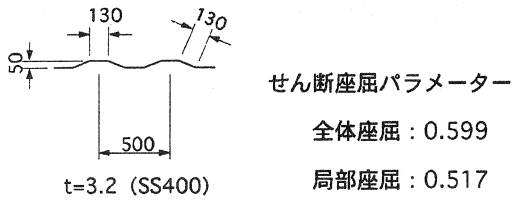
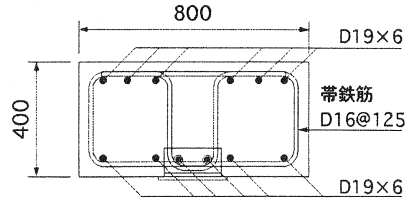
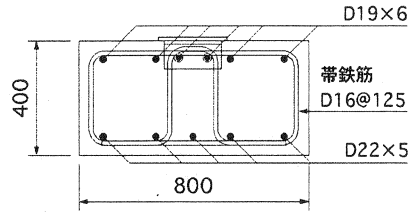


図-2 波形鋼板仕様

ケース2のコンクリート床版の寸法は、実橋での事例を鑑み、弾性状態でのウェブのせん断力分担率が約80%となるように設定した。実橋に近い挙動を再現するため、載荷時に床版の引張鉄筋は降伏するが、桁の曲げ耐力がせん断耐力より若干大きくなるように配筋等を決定した。図-3に床版の配筋を示す。



(a) 上床版



(b) 下床版

図-3 ケース2 床版配筋図

3. 複合非線形解析

(1) 解析モデル

ケース1、2ともに鋼部材はシェル要素でモデル化し、波形鋼板ウェブについてはパネル幅当たり4要素に分割した。図-4にケース1の解析モデルを示す。

ケース2のコンクリート床版はモデルの簡素化および解析時間の短縮を図るため、梁要素でモデル化し、橋軸方向の主鉄筋については埋込み鉄筋要素 (Embedded Reinforcements) を用いた。フランジとコンクリート床版との結合部は橋軸方向のずれを表現できるように、フランジの各節点とコンクリート梁の節点を軸方向のみバネで結合するモデルとした。軸方向以外の自由度については、剛梁 (フランジとコンクリート梁の節点間に剛な梁が存在することに相当する) 結合とした。図-5にケース2の解析モデルを示す。また、ケース1、2ともに対称条件を利用した1/2モデルとした。

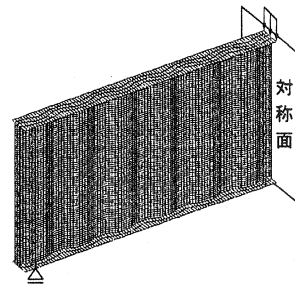


図-4 ケース1 解析モデル

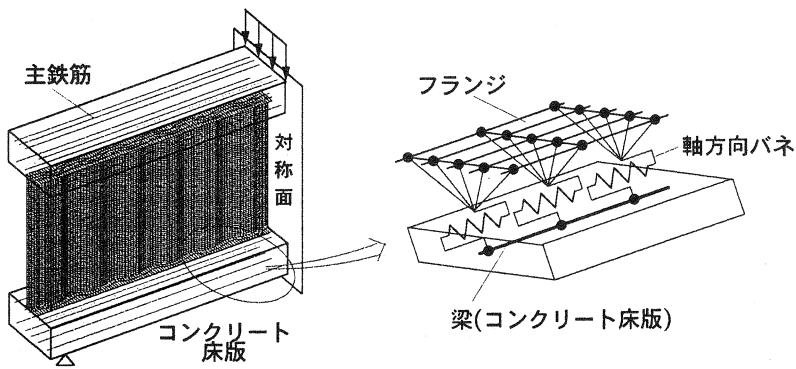


図-5 ケース2 解析モデル

(2) 解析手法

模型実験との詳細な比較を行うため、材料の非線形性および幾何学的非線形性を考慮した FEM による複合非線形解析を実施した。解析プログラムは汎用構造解析プログラム「DIANA」を用いた。

鋼材の材料定数は、引張強度試験を行い設定した。特に、波形鋼板ウェブについては、応力-ひずみの関係を multi-linear (複数の線形データ) として入力した。図-6 に波形鋼板ウェブの応力-ひずみ関係を示す。

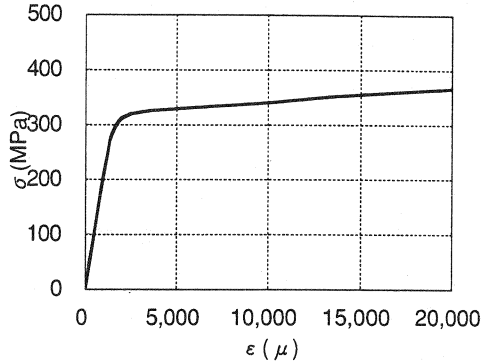


図-6 波形鋼板ウェブの応力-ひずみ関係

コンクリートの材料定数は、圧縮強度試験の結果をもとに設定した。引張強度 f_t については、Prestressed Concrete Basics⁴⁾ から

$$f_t = 0.33\sqrt{f_c} \tag{1}$$

ここに、 f_c : 圧縮強度

と仮定し、ひび割れ発生後は引張硬化 (Tension-Stiffening) を考慮し、図-7 に示すように応力が緩やかに低下するものとした。

(1)式から得られる引張強度は、土木学会コンクリート標準示方書⁵⁾における寸法効果の影響を考慮した算定式

$$f_t = k_1 \cdot 0.23f_c^{2/3} \tag{2}$$

ここに、 f_c : 圧縮強度、

k_1 : 寸法効果に関する係数、 $k_1 = 0.6/(h^{1/3})$ (ただし、 $0.4 \leq k_1 \leq 1.0$ とする。)

h : 部材の高さ (m)

を用いた値とほぼ一致する。

また、ひび割れ発生後のせん断剛性 (Shear-Retention) は、American Concrete Institute の文献⁶⁾から、図-8 に示すように低減するものとした。

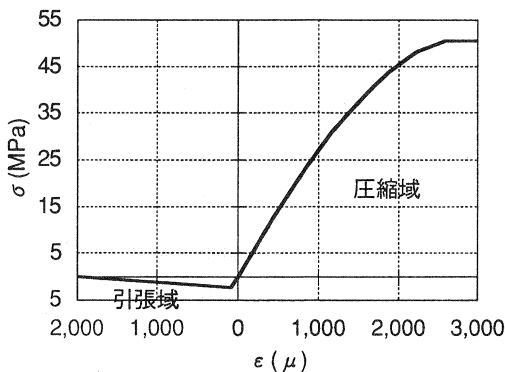


図-7 コンクリートの軸方向応力-ひずみ関係

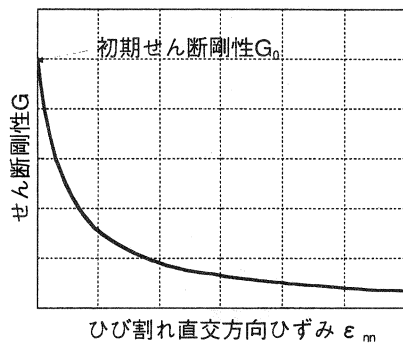


図-8 コンクリートのせん断剛性

フランジとコンクリート床版の結合部における軸方向バネ値は、立神らによるアングルジベルのせん断耐力に関する実験結果⁷⁾を基に算定した。図-9 にアングルジベルのずれ耐力を示す。

本検討では、波形鋼板ウェブについて面外方向の初期不整を考慮した。不整値は荷重試験に先立ち、試験体より計測した。初期不整の最大値は各ケースにおいて4～6mm程度であった。なお、鋼部材の溶接時に生じる残留応力については考慮していない。

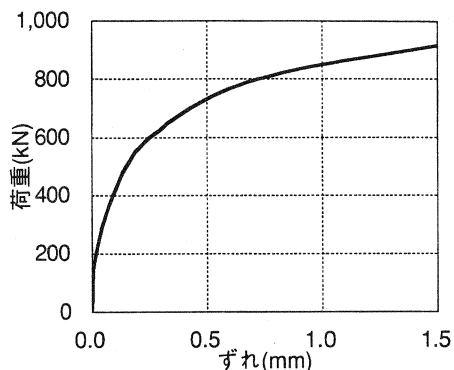
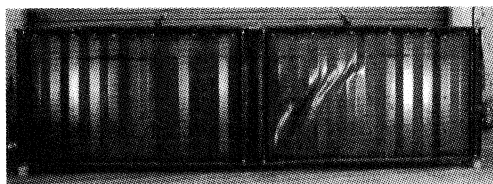


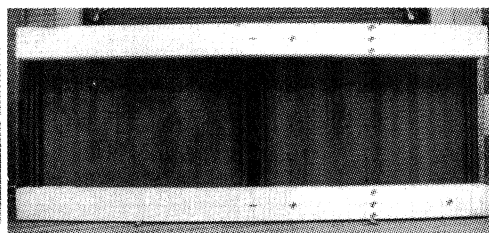
図-9 アングルジベルのずれ耐力

4. 実験と解析の比較

(1) 実験結果



ケース 1



ケース 2

図-10 波形鋼板ウェブ座屈状況

実験は、ケース 1、ケース 2とも波形鋼板ウェブのせん断座屈により終局状態に至った。図-10 に波形鋼板ウェブの座屈状況の写真を示す。座屈はケース 1、ケース 2とも大きな音とともに瞬間的に発生した。座屈発生時の音はケース 1の方がケース 2よりも大きかった。

図-11 に、ケース 2の終局時におけるひびわれ損傷図を示す。上床版においてはひび割れは上面まで進展せず上部が圧縮領域となっているが、下床版においてはひび割れは上面まで貫通している。

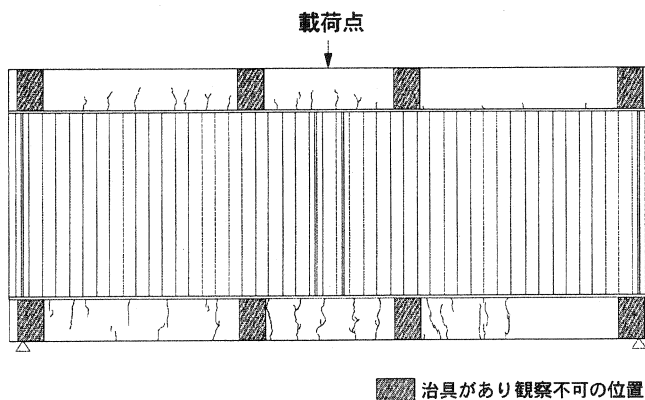


図-11 ケース 2 終局時 (P=2353kN) ひび割れ損傷図

(2) 解析結果

載荷荷重と鉛直変位の関係を図-12 に示す。変位の計測位置はケース1が下フランジ中央、ケース2がコンクリート下床版中央である。ケース1、2ともに実験と解析の曲線履歴はよく一致している。ケース1において、実験と解析との最大荷重および変位の差はともに5%以内である。ケース2では変位の差は3割程度あるものの、最大荷重の差は5%におさまっている。載荷荷重の小さい(ほぼ弾性)範囲においては、コンクリート床版を有するケース2の剛性はケース1の約2倍であることがわかる。

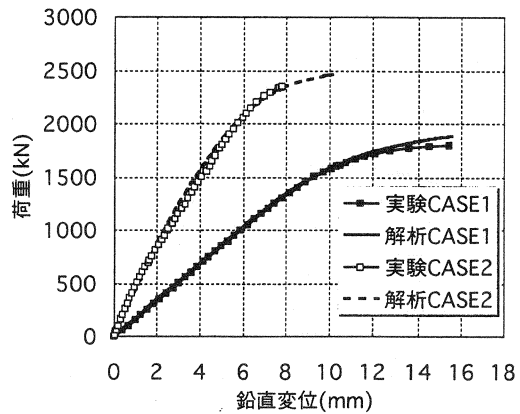


図-12 荷重-鉛直変位の関係

載荷荷重と面外変位の関係を図-13、14 に示す(出力位置は図-1 を参照)。ケース1、2ともに実験と解析の変形モードは比較的良好に一致している。

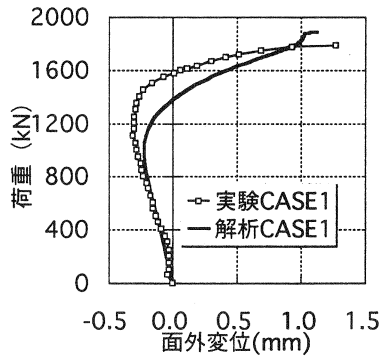


図-13 ケース1 荷重-面外変位

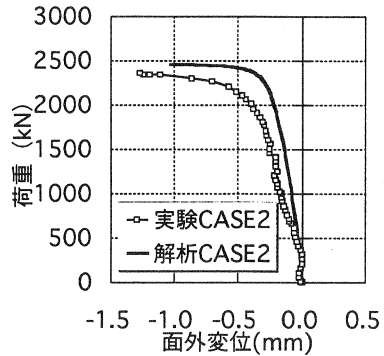


図-14 ケース2 荷重-面外変位

波形鋼板ウェブのせん断挙動に対するコンクリート床版の影響について以下に述べる。ケース2における波形ウェブが分担するせん断力の割合を図-15、16 に示す。

実験結果からは、載荷荷重(ここではせん断力)の増加とともに波形ウェブの分担率も緩やかに増加している。また、支点から支間中央に近づく(図中 2500mm→500mm)につれて分担率は減少している。

これに対して、解析結果では、載荷荷重の増加とともに分担率が緩やかに増加する傾向は実験結果と同じであるが、支間中央付近でのせん断力の分担率は、実験結果に比べ大きくなっている。

これは、解析では、コンクリート床版を梁要素でモデル化しているため、鉛直荷重が床版内で分散されにくいことが主要因であると考えられる。

一方、ケース1では、波形鋼板ウェブの全域でせん断ひずみに大差はなく、解析結果は実験をよく

模擬できている。

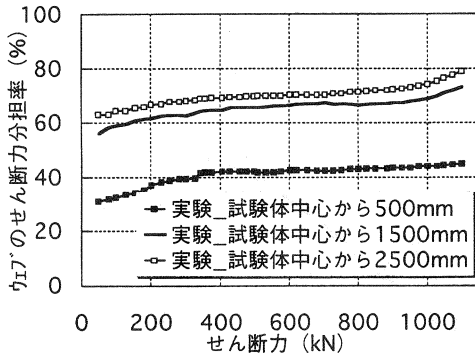


図-15 ケース2 実験 波形ウェブのせん断力分担率

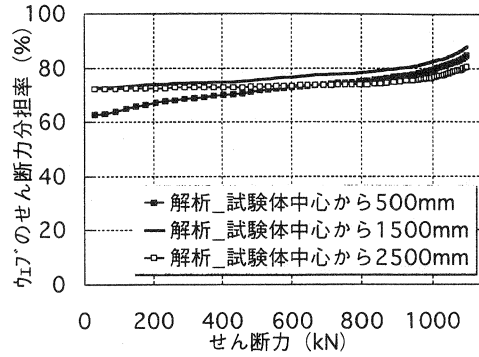


図-16 ケース2 解析 波形ウェブのせん断力分担率

5. まとめ

本検討から、波形鋼板ウェブ桁の解析を行うにあたり、モデル化、解析手法について以下のことがわかった。

- ・ 材料非線形および幾何学的非線形を考慮した複合非線形解析により、座屈荷重を精度よく求めることができた。特に、床版のない鋼のみのケースでは、荷重、変位ともに実験結果との差は5%以内であった。
- ・ RC 床版付きのケースでも、フランジと床版との間で軸方向のずれを表現できる解析モデルとしたことで、床版が非線形領域に達する状態まで実験結果を再現することができた。
- ・ また、床版を梁要素でモデル化することは、ソリッド要素を用いた場合に比べ、モデルの簡素化が図られ解析時間も大幅に短縮できる。
- ・ 床版付きのケースにおいては、支間中央付近での波形ウェブのせん断力分担率は、解析結果の方が実験に比べ大きくなっていった。これは、床版を梁要素でモデル化しているため、載荷荷重が床版内で分散されないためと考えられる。この点に関しては、今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) 青木・渡邊・角谷・富本：有限変位解析による波形鋼板ウェブの耐荷力評価、土木学会第55回 年次学術講演会論文集 1-A、pp.344~345、2000.9
- 2) Watanabe・Kadotani・Miyachi・Tomimoto・Kano：Shear Buckling of Corrugated Steel Web、First International Conference on Structural Stability and Dynamics、2000.12
- 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)、1998.12
- 4) M.Collins and D.Mitchell：Prestressed Concrete Basics、Canadian Prestressed Concrete Institute、1987
- 5) 土木学会コンクリート標準示方書、設計編、1996
- 6) T.Pauley and P.S.Loebner：Shear transfer by aggregate interlock Shear in reinforced concrete、Volume 1、Special Publication SP-42、American Concrete Institute、1974
- 7) 立神・蛭名・上平・柳下：アングルジベルのせん断耐力に関する基礎的研究、第9回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp.79~84、1999.10