

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2) 片持梁

大成建設 (株) 土木設計第1部	正会員	○藤倉 修一
同 上	正会員	白谷 宏司
同 上	正会員	今井 義明
大成建設 (株) 技術センター		坂下 克之

1. はじめに

波形鋼板ウェブPC橋の連続桁の中間支点 (柱頭部) 付近は、大きな曲げモーメントとせん断力を同時に受ける。また、一般には桁高が高くなってウェブ鋼板の座屈の危険性が増すため、ウェブの設計においては最も重要な箇所である。柱頭部のウェブは、ウェブのせん断変形をコンクリート床版が拘束すること、横方向および軸方向の変形を横桁が拘束することなどにより、挙動特性が一般部より複雑であると考えられるが、波形鋼板ウェブ橋の柱頭部の挙動に対する今までの検討事例は主に弾性範囲を対象としており<sup>1) 2)</sup>、終局荷重時の挙動については明確にされていない。

そこで、本検討では、RC床版付きの波形鋼板ウェブ片持梁を対象として、本論文 (その1) と同様の非線形FEM解析および模型実験を実施し、柱頭部付近の終局荷重時の波形鋼板ウェブの基本的挙動特性の把握を試みた。

2. 実験概要

実験で使用したコンクリート床版付きの波形鋼板ウェブ片持梁試験体 (ケース3) の概要を図-1に、床版の配筋を図-2に示す。ここで、荷重点側の床版を上床版、もう一方の床版を下床版とした。波形鋼板ウェブ形状およびコンクリート床版形状は本論文 (その1) のケース2と同じ仕様とした。軸方向鉄筋量は、FEM解析により波形鋼板が座屈する前に上床版の軸方向鉄筋が降伏するように決定した。図-3に示すように、試験体を反力床に固定し、反力壁を用いて300t油圧ジャッキにより水平に荷重を行った。横倒防止装置を用いて、試験体全体が大きく面外方向に変形するのを抑制し、試験体と横倒防止装置との間にはテフロン板を挿入することにより、大きな摩擦力が働かないように配慮した。

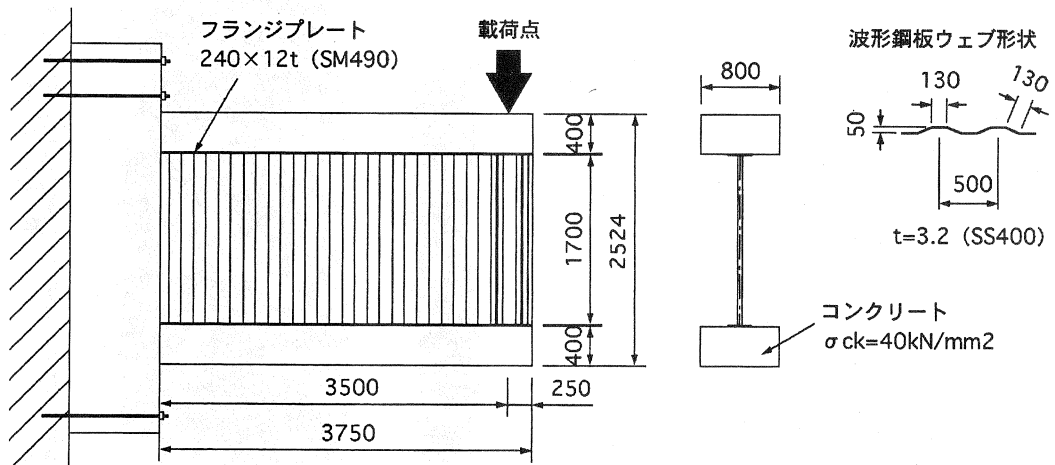


図-1 ケース3試験体概要図

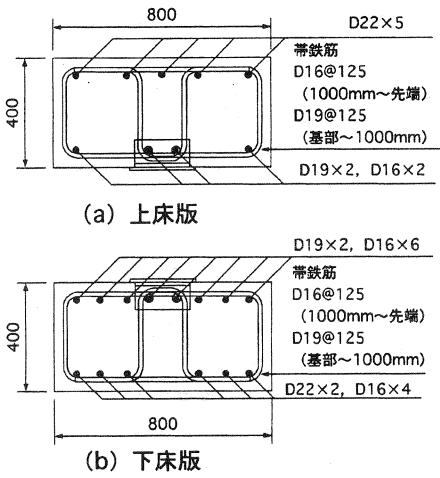


図-2 ケース3床版配筋図

3. 複合非線形解析

模型実験との比較を行うため、材料の非線形性および幾何学的非線形性を考慮したFEM解析による、本論文(その1)と同様の複合非線形解析を実施した。解析モデルを図-4に示す。鋼部材はシェル要素、コンクリート床版は梁要素でモデル化し、フランジプレートとコンクリート床版はバネ要素を用いて結合した。コンクリート、鋼材の材料特性およびバネ要素のバネ値は本論文(その1)同様に設定を行った。

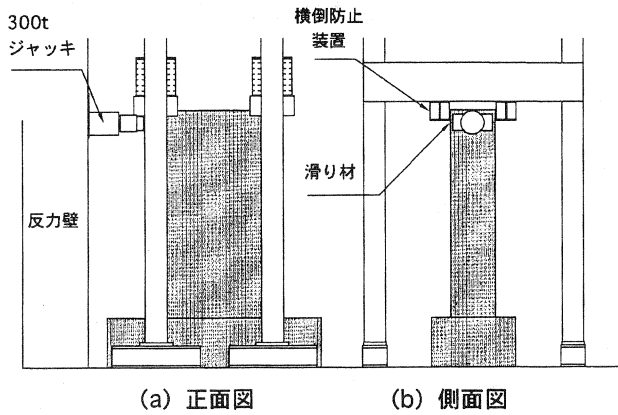


図-3 ケース3 載荷試験概要図

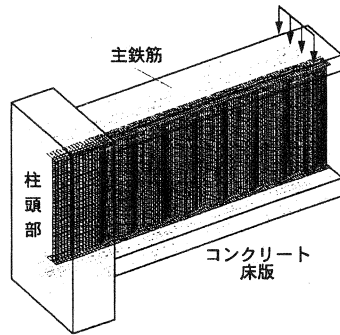


図-4 ケース3 解析モデル図

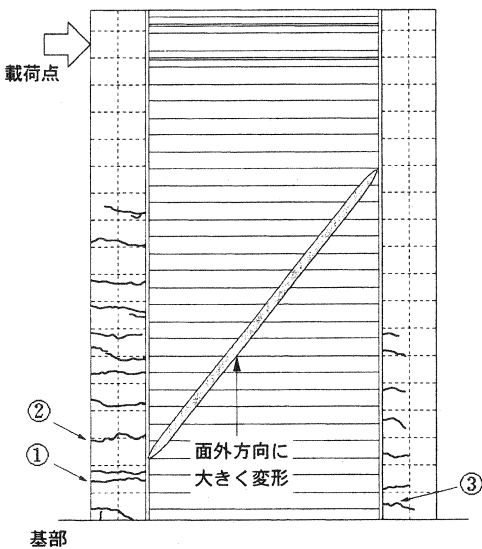


図-5 ケース3 試験体損傷図

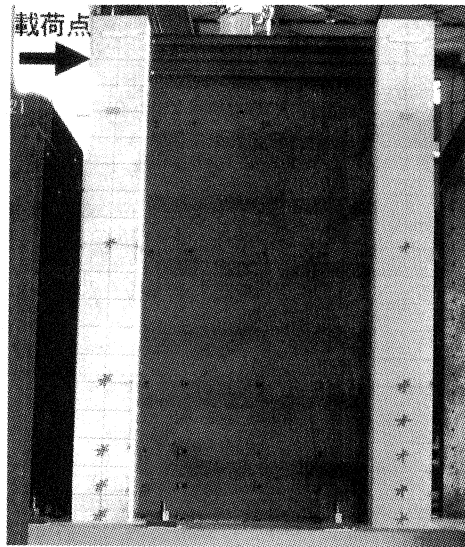


写真-1 ケース3 波形鋼板座屈状況

4. 検討結果

(1) 破壊性状

載荷点荷重 P が 1237kN に達したとき、波形鋼板ウェブは座屈し、上床版側の基部から斜め方向に面外変形を起こした。座屈直後の波形鋼板座屈状況および目視により観測を行った床版のひび割れ状況を図-5および写真-1に示す。上床版側のひび割れは外側から内側まで伸展しているのに対して、下床版側のひび割れは内側から断面の中心位までの伸展が見られた。ひび割れ幅は、図-5において①0.35mm②0.50mm③0.15mm程度であった。座屈荷重時における鉄筋ひずみは上床版の上段、下段ともに  $2100\mu$  であり降伏域に達していた。

(2) 荷重-変位特性

載荷点における下床版外側の変位と荷重との関係を図-6に、実験と解析との座屈荷重および終局変位に関する比較を表-1に示す。座屈荷重では3%程度、終局変位では10%程度の差となっており、実験値と解析値は良い精度で一致している。荷重-変位関係においては、荷重が250kNまではほぼ同じ履歴を示しているが、250kN以降は解析結果よりも実験結果の方が剛性は小さいことが分かる。このことは、実験においては、柱頭部横桁内にひび割れが生じたためと考えられる。

表-1 座屈荷重および終局変位

	座屈荷重 (kN)	終局変位 (mm)
実験	1237	13.3
解析	1270	12.0

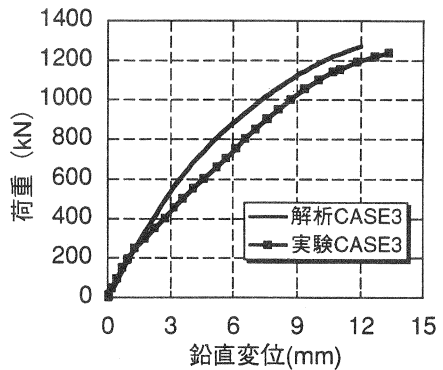


図-6 荷重-鉛直変位関係

(3) 床版の付加曲げ

柱頭部のような中間支点付近では、せん断力による床版への局部曲げの現象が指摘されている<sup>2)</sup>。このことは、次のように説明することができる。図-7(a)の点線が示すようにせん断力によってウェブは変形しようとするが、柱頭部の横桁面では上下床版のたわみ角がほぼゼロとなるため、ウェブの変形が上下床版によ

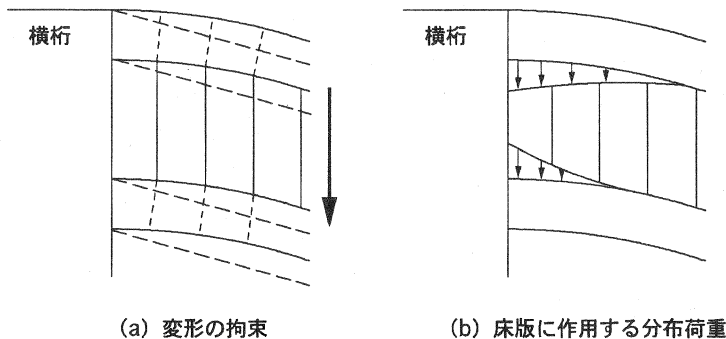


図-7 せん断力による床版の局部曲げ

て拘束され実際には図7-(a)の実線が示す変形となる。この拘束によって図7-(b)に示すように、ウェブの上側には引張力が作用し、ウェブの下側には圧縮力が作用するために、床版には局部的に曲げが発生すると考えられる。図-8に柱頭部付近における上床版および下床版に近い鋼板ウェブの鉛直方向ひずみを示す。実験値に比べ解析値の方が2倍ほど大きい、いずれの結果も、柱頭部付近のウェブ上側には引張力が作用し、ウェブ下側には圧縮力が作用することを示している。

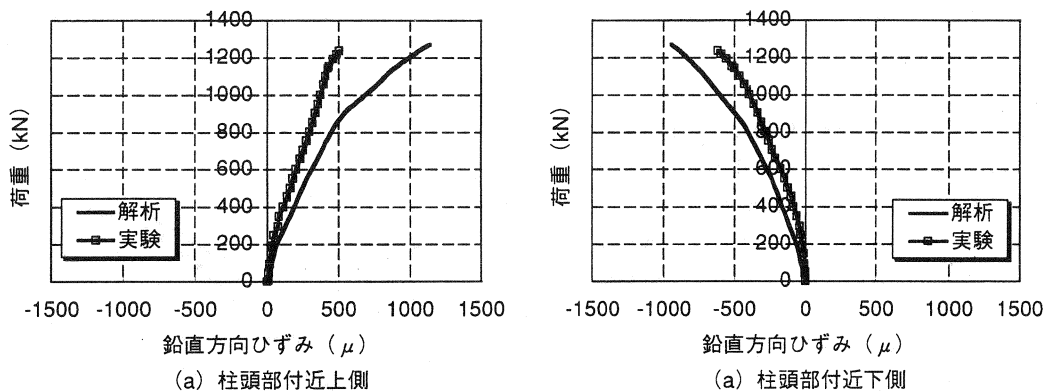


図-8 柱頭部付近の鋼板ウェブ鉛直方向ひずみ

(4) ウェブのせん断挙動

せん断力の増加による鋼板ウェブのせん断力分担率の変化を図-9に示す。実験では、各断面において高さ方向に5点の3軸ひずみゲージを貼り付け鋼板のひずみを計測し、これをもとに最大せん断ひずみを算定し、各断面の鋼板ウェブが負担するせん断力を求めた。解析値も、実験における3軸ひずみゲージと同位置の最大せん断ひずみから算定することとした。図-9によれば、実験、解析ともにせん断力の増加とともにせん断力分担率は漸増していることがわかる。これは、載荷荷重の増加とともにコンクリートに発生するひび割れが増加し、コンクリート床版が負担しているせん断力の分を徐々に鋼板ウェブが負担しているためと考えられる。また、基部に近づくほどせん断力の分担率は低くなる傾向が見られ、実験と解析とで同じ傾向であった。

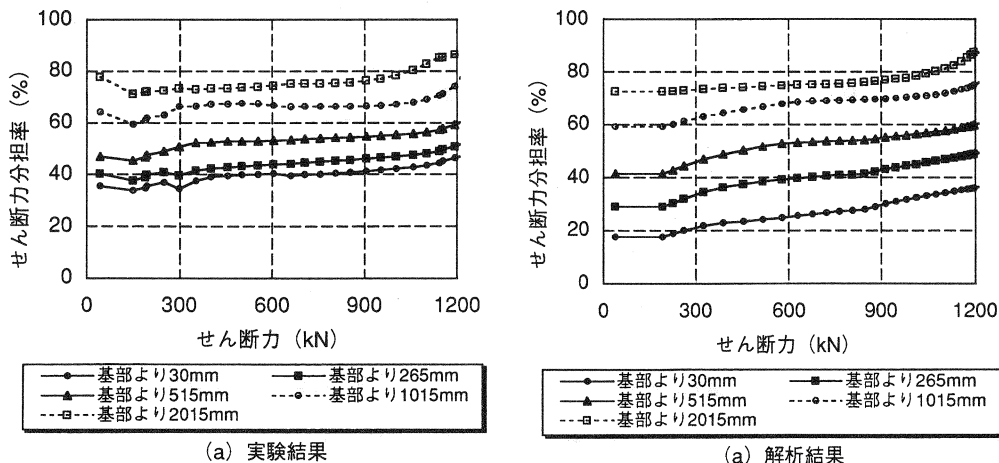


図-9 鋼板ウェブのせん断力分担率

柱頭部付近におけるコンクリート床版と鋼板ウェブのせん断力分担率の変化は、次のように説明することができる。上下床版およびウェブを、図-10に示すようにそれぞれ独立の梁と考える。上下床版のせん断変形を無視し、さらに簡略化のため床版の断面諸元が x 方向に一定とすると、各梁の荷重とせん断変形の関係は、

上床版

$$\frac{d^2z}{dx^2} = -\frac{M_u}{E_c I_u}$$

$$\frac{d^4z}{dx^4} = \frac{p_u}{E_c I_u}$$

$$\left( p_u = -\frac{d^2 M_u}{dx^2} \right)$$

下床版

$$\frac{d^2z}{dx^2} = -\frac{M_l}{E_c I_l}$$

$$\frac{d^4z}{dx^4} = \frac{p_l}{E_c I_l}$$

$$\left( p_l = -\frac{d^2 M_l}{dx^2} \right)$$

ウェブ

$$\frac{dz}{dx} = \frac{S}{G_s I_t} Q - \frac{1}{G_s t h} (Q_u + Q_l)$$

$$\frac{d^2z}{dx^2} = \frac{S}{G_s I_t} \frac{dQ}{dx} + \frac{1}{G_s t h} (p_u + p_l)$$

$$\frac{d^4z}{dx^4} = \frac{S}{G_s I_t} \frac{d^3 Q}{dx^3} + \frac{1}{G_s t h} \left( \frac{d^2 p_u}{dx^2} + \frac{d^2 p_l}{dx^2} \right)$$

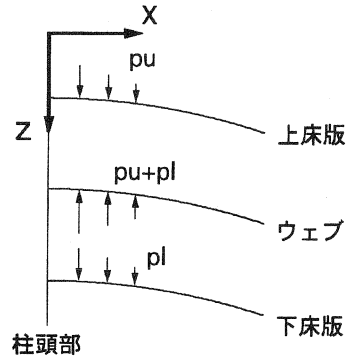


図-10 梁による柱頭部付近のモデル化

ここに S : 主桁断面の中立軸から上または下側の部分の中立軸に対する断面 1 次モーメント

I : 主桁の断面 2 次モーメント

$G_s$  : ウェブのせん断弾性係数

t : ウェブの板厚

Q : x におけるせん断力 ( $Q=Q_0$  at  $x=0$ )

$E_c$  : コンクリートのヤング係数

$I_u, I_l$  : 上床版、下床版の断面 2 次モーメント

h : 波形鋼板ウェブ高

これらを連立方程式として解くと、

$$\gamma = \frac{dz}{dx} = \frac{S}{G_s I_t} [Q - Q_0 \exp(-\alpha x)]$$

$$\rightarrow \tau = \frac{S}{I_t} [Q - Q_0 \exp(-\alpha x)] \dots\dots (1)$$

ここに、 $\alpha = \sqrt{\frac{G_s t h}{E_c (I_u + I_l)}}$

式 (1) の第 2 項は柱頭部付近におけるウェブのせん断応力の減衰を表し、柱頭部では、ウェブのせん断変形に対するコンクリート床版の拘束によって、ウェブのせん断応力が低減することがわかる。また、 $\alpha$  は上下床版の曲げ剛性とウェブのせん断剛性の比を表すパラメータで、 $\alpha$  が小さい、すなわち床版の剛性が大きいと、式 (1) の第 2 項によりせん断力が低減される区間が広がる。

(5) ウェブおよびフランジプレートの軸方向応力

大内山川第二橋工事における実物大模型を用いた鉛直載荷試験<sup>3)</sup>によれば、柱頭部において鋼板ウェブが引張材として機能し、柱頭部付近での桁の耐力増加に大きく寄与していると考えられる。本実験での座屈荷重時における柱頭部付近上床版側のウェブの軸方向ひずみは  $360\mu$ 、フランジプレートの軸方向ひずみは  $1110\mu$  であり、降伏域には至っていない。このことは、実物大模型鉛直載荷試験ではフランジプレートが柱頭部に埋め込まれていなかったのに対して本実験では埋め込まれていたこと、本実験での鋼板ウェブ波形はせん断座屈するように設定されており鋼板ウェブやフランジプレートが軸方向力を分担する前に破壊に至ったことが原因と考えられる。

5. まとめ

- ・ 波形鋼板ウェブ橋の柱頭部では、ウェブのせん断変形に対するコンクリート床版の拘束によって、ウェブのせん断応力が低減する。従来の波形鋼板ウェブがせん断力をすべて受け持つ設計法は安全側ではあるが、今回の解析法を用いることにより詳細な検討を行い、鋼板厚を小さくする等の合理的な設計を行うことが出来る。
- ・ 柱頭部でのコンクリート床版付近の鋼板ウェブには鉛直方向に引張力ならびに圧縮力が働き、コンクリート床版には付加曲げが生じる。床版と鋼板ウェブの間に生じる引張力に対しては適切な補強を施し、床版の付加曲げに対しても設計的な配慮をする必要がある。
- ・ 一般的に、柱頭部は床版の曲げ応力とウェブのせん断応力の両者が最も厳しくなる箇所であり、特に終局時の主桁のせん断力に対する波形鋼板ウェブの負担率を予測する上では、クラック発生後のコンクリート床版のせん断剛性の評価の精度が重要になる。本解析のコンクリートのせん断剛性の評価方法は概ね妥当であったと言える。
- ・ 終局時の曲げに対する波形鋼板ウェブの寄与は依然として未解明であり、設計の合理化を図るためには今後検討しなければならない課題であると考えられる。

参考文献

- 1) 水口・芦塚・大浦・日高：波形鋼板ウェブPC橋のせん断力分担率と床版の付加曲げについて、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 59 - 62、1999.10
- 2) J. Combault・大浦訳：シャロール近くのモープレ高架橋、プレストレストコンクリート Vol. 34、No. 1、pp 63 - 71、1992.1
- 3) 池田・水口・白谷・藤倉：カンチレバー外ケーブルの終局荷重時の張力増加に対する検討、第10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 475 - 480、2000.10