

波形鋼板ウェブのアコーディオン効果の二次元モデルとその適用性

2D-Modeling of Accordion Effect in Corrugated Steel Web and its Applicability

黄 玲*・彦坂 熙**・小嶺啓蔵***

Ling HUANG, Hiroshi HIKOSAKA and Keizo KOMINE

* 正会員 工博 九州大学助手 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

** フェロー会員 工博 九州大学教授 工学研究院建設デザイン部門 (同 上)

*** 正会員 オリエンタル建設(株) 福岡支店副支店長 (〒810-0001 福岡市中央区天神 4-2-31)

Prestressed concrete box girder with corrugated steel web is one of the promising concrete-steel hybrid structures applied to highway bridges. Prestress is efficiently induced into the top and bottom concrete flanges due to the so-called “accordion effect” of corrugated web. In this paper a simple 2-D analysis is presented to account for 3-D phenomena of the accordion effect using 2-D link-type elements. In the vertical direction, links are given a very high stiffness to fully transmit vertical shear force. In the horizontal direction, the link stiffness is given a value calculated from the out-of-plane bending of a folded plate forming each trapezoidal corrugation. Viability of the approach is demonstrated through comparison of experimental and numerical results on a large scale specimen of prestressed concrete beam with corrugated steel web.

Key Words: *corrugated web, accordion effect, composite structure, prestressed concrete*

1. 緒言

近年、橋梁の設計・施工の合理化とコスト削減を目指した技術開発の一環として、フランジにコンクリート、ウェブに波形鋼板を用いる鋼-コンクリート複合 PC (プレストレストコンクリート) 箱桁橋が採用されるようになり、斜張ケーブルを併用したスパンの長大化も図られている。PC 橋に波形鋼板ウェブを用いる利点は、次の通りである¹⁾。

- 1) 主桁自重が大幅に軽くなり、橋脚・基礎も縮小できるので、建設コストが低減する。
- 2) コンクリートウェブに必要な型枠、配筋、コンクリート打設が不要となり、張出し施工の 1 セグメントを長く取れるので、施工が合理化され工期も短縮する。
- 3) 波形鋼板ウェブは“アコーディオン効果”により橋軸方向剛性が著しく小さいので、主桁プレストレス導入効率がコンクリートウェブの場合より向上する。
- 4) 波形鋼板は平鋼板より高い面外曲げ剛性を有するので、ウェブのせん断座屈強度が向上する。

波形鋼板ウェブをもつ PC 主桁の曲げおよび軸方向力に対する設計は、上記 3) のアコーディオン効果を考慮し、上下のコンクリートフランジ断面

のみを用いた曲げおよび伸縮剛性に基づくはり理論により行われている。しかし、アコーディオン効果の本質は波形ウェブ鋼板の面外曲げにあり、はり理論の基礎である断面の平面保持が成立しない。ずれ止め等を介してコンクリートフランジが接合されるウェブの上下端近傍では、波形鋼板に大きな軸方向ひずみが発生し、そのウェブ高さ方向の急なひずみ勾配とウェブの溶接継手部の応力集中に注意が必要である。また、薄肉の鋼板ウェブは厚いコンクリートウェブに比べて鉛直せん断剛性が著しく小さく、このせん断変形がたわみに及ぼす影響を無視できない。コンクリートフランジが集中荷重を受ける近傍の断面では、波形鋼板ウェブのせん断変形とアコーディオン効果の複合作用が特に顕著に現れ、フランジに著しい付加曲げ応力が発生する。連続桁の中間支点部や斜張橋のケーブル定着部も同様であり、設計に際して有効な対応策が必要となる。以上の通り、本 PC 桁橋を合理的、経済的に設計するためには、波形鋼板ウェブのアコーディオン効果を力学的に正しく理解することが不可欠である。

鋼板の面内変形と面外曲げを伴う波形ウェブのアコーディオン効果を詳細にシミュレートするには、薄肉シェル要素を用いた 3 次元 FEM 解析等が必要になる。しかし本研究では、簡易で実用的な解析により波形鋼板ウェブをもつ PC 桁橋

に特有の挙動を明らかにするとともに、その設計に有用な基礎資料を得ることを目的として、3次元アコーディオン効果を2次元的に取扱う手法を提示する。また、波形ウェブに固有のせん断剛性低減効果を定式化する。ここに提案する手法の適用性の検証は、大型供試体による既往の実験結果との比較により行う。

2. 波形鋼板ウェブのアコーディオン効果とせん断変形

2.1 波形鋼板ウェブの平板-ばね系モデル

構造用鋼板を波形に折り曲げたウェブに上下のコンクリートフランジ（床版）を合成して主桁を形成し、PC ケーブルによりコンクリートフランジにプレストレスを導入する形式の橋を、波形ウェブ橋と呼ぶ。波形ウェブは、図-1(a)のように、橋軸に平行な軸方向板パネルと傾斜角 θ の斜方向板パネルからなる。主桁がプレストレス、死荷重、活荷重等の作用を受けるとき、波形ウェブの各板パネルには面内変形に加えて面外曲げ変形も生じる点が、実質的に平面応力状態にある平鋼板ウェブとの大きな違いである。しかし、断面寸法に比してスパンが十分に大きい橋桁では、板パネルの面外曲げ変形に伴う波形ウェブの橋軸方向伸縮（アコーディオン効果）を適切なばねでモデル化することにより、波形ウェブを等価な2次元（平面）ウェブに置き換えることができる。

いま、図-1(a)のような板厚 t 、軸方向パネル幅 b 、斜方向パネル幅 $2s$ の波形ウェブを、斜方向パネルの midpoint A, B で切出された半波長の折板の繰返しと考える。ウェブのアコーディオン効果に対する軸方向剛性を簡易に評価するため、ウェブ高さが単位長1の半波長ウェブを同図(b)の台形折板と考え、端点 A, B に働く一対の仮想力 P による折板部材の軸力と曲げモーメントから AB 間の

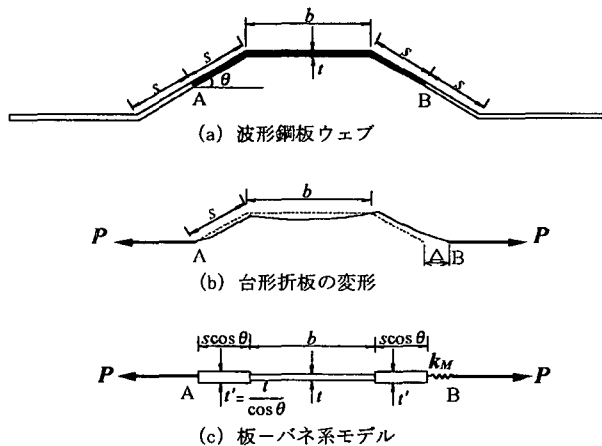


図-1 波形鋼板ウェブのモデル

軸方向相対変位 Δ を求めれば、

$$\Delta = \left(\frac{1}{k_N} + \frac{1}{k_M} \right) P \quad (1)$$

ここに、

$$k_N = \frac{E_s t}{b + 2s \cos^2 \theta} \quad (2)$$

$$k_M = \frac{E_s t^3}{12s^2 \left(b + \frac{2s}{3} \right) \sin^2 \theta} \quad (3)$$

E_s はウェブ材のヤング係数である。式(1)において、 P/k_N , P/k_M はそれぞれ軸方向相対変位 Δ に対するウェブ折板の面内変形と面外曲げ変形の寄与分を表す。実橋によく用いられる $t=12\text{mm}$, $b=2s=430\text{mm}$, $\theta=30^\circ$ の波形鋼板ウェブの場合、 $k_N=3.3\text{ kN/mm}^2$, $k_M=k_N/767=4.3\text{ N/mm}^2$ となり、そのアコーディオン効果はウェブ折板の面外曲げ変形に起因することが分かる。

図-1(c)の構造系は、図(b)の台形折板の水平射影長 $b+2s\cos\theta$ をもつ棒に剛性 k_M の軸方向ばねを直列に組合わせたものである。ただし、波形ウェブの斜方向パネルを射影した長さ $s\cos\theta$ の部分の板厚を $t'=t/\cos\theta$ に置き換える。図(c)の板-ばね系 AB が軸力 P を受けるとき、AB 間の軸方向相対変位は式(1)の Δ に厳密に一致する。すなわち、波形ウェブが平板-ばね構造系にモデル化され、ばねの伸縮が波形ウェブのアコーディオン効果を模擬することになる。

2.2 アコーディオンリンク要素

本研究では、波形鋼板ウェブを図-1(c)の平板-ばね系にモデル化して2次元 FEM 解析を行う。その際、波形ウェブの斜方向パネル中央鉛直線上に設けられる節点では、相隣る半波長の台形折板を図-2に示す2次元アコーディオンリンク要素で接合する。リンク要素は大きさを持たず、リン

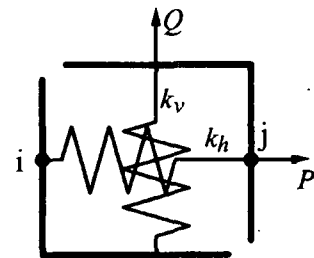


図-2 アコーディオンリンク要素

ク左右の2節点 i, j は無載荷時に同一座標を有する。リンク要素の水平ばね剛性 k_h は、単位長のウェブ高さに対して算定される式(3)の k_M にウェブの鉛直方向節点間距離を乗じて得られる。鉛直ばね剛性 k_v には、リンク左右の2節点 i, j が鉛直方向相対変位を生じないように大きな値を与えて、せん断力 Q を完全に伝達させる。コンクリートフランジが接合されるウェブの上下端近傍ではアコーディオン効果が拘束され、波形鋼板に大きな軸方向ひずみが発生する現象も、このモデルでシミュレートできる。

2.3 波形ウェブのせん断剛性低減

山口ら²⁾ は、コンクリートフランジの代わりに鋼フランジを有する波形鋼板ウェブ桁のせん断挙動に関する載荷試験を行い、曲げモーメントに抵抗せずせん断力のみ抵抗している波形ウェブにおいて、相隣る軸方向パネルと斜方向パネルに生じるせん断応力の大きさがほぼ等しいことを見出している。図-1(b)の半波長ウェブにおいて、軸方向および斜方向パネルのせん断応力が等しく τ とすれば、斜方向パネル1枚のせん断ひずみエネルギーは $U = ts\tau^2/2G_s$ となる。ここに、 ts はウェブ高さ単位長当たりの斜方向パネルの体積、 G_s はウェブ材のせん断弾性係数である。他方、さきに提案した図-1(c)の平板モデルにおいて、斜方向パネルの体積は ts に等置されているが、その換算板厚が $t' = t/\cos\theta$ であるため、せん断応力は軸方向パネルの τ より小さい $\tau\cos\theta$ となる。したがって、せん断ひずみエネルギーを U に等しくするために、換算板厚 t' の平板については等価せん断弾性係数 $G_s' = G_s\cos^2\theta$ を用いる。このように波形鋼板ウェブには、薄肉であることに加えて波形形状の幾何学的要因によるせん断剛性の低減がある。

3. 波形鋼板ウェブ PC はりの有限要素モデル

3.1 はり供試体の諸元と要素分割

阿田ら³⁾ による載荷試験結果が報告されている図-3の波形鋼板ウェブ PC はり供試体を対象として、本提案モデルを用いた2次元 FEM 解析を行い、モデルの適用性を明らかにする。供試体の波形鋼板ウェブは板厚 9mm の SM490Y 材で製作され、その軸方向および斜方向パネル幅 $b = 2s = 430\text{mm}$ 、傾斜角 $\theta = 30^\circ$ は、実橋⁴⁾ に用いられているものと同じである。ウェブの上下端には $320 \times 16\text{mm}$ の鋼フランジが溶接され、鋼フランジの上下面に配置されたアングルジベルを介して厚さ 27cm、幅 100cm のコンクリートフランジが

取付けられている。上下のコンクリートフランジには、それぞれ軸方向鉄筋 D16 が2段に14本配置されている。図-3の J1~J4 は鋼板ウェブの継手部を示すが、これらの位置で鋼フランジは接合されず不連続である。載荷試験が行われた材令 10 日におけるコンクリートの圧縮強度 $f_c' = 37.9\text{MPa}$ 、ヤング係数 $E_c = 23.8\text{GPa}$ を解析にも用いる。

単純支持はり供試体(支間長 12.8m)の2次元 FEM メッシュと支点、および2個の集中荷重 P1, P2 の作用点を図-4に示す。コンクリートフランジと鋼ウェブに平面応力要素、鋼フランジと軸方向鉄筋に1次元棒要素を用いた。FEM メッシュおよび用いた要素の妥当性は、以下に示す実験値との比較により評価される。ウェブにおいて●を付した節点に図-2のアコーディオンリンク要素を9

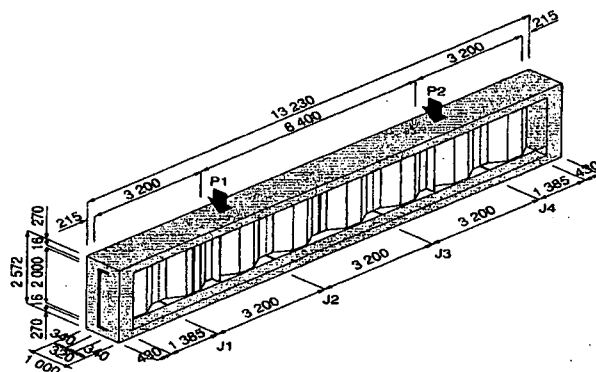


図-3 波形鋼板ウェブ PC はり供試体³⁾ (mm)

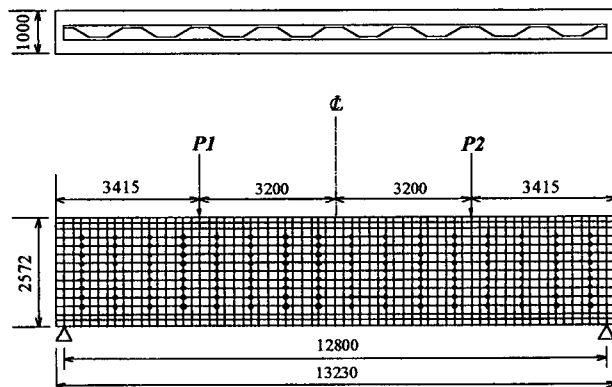
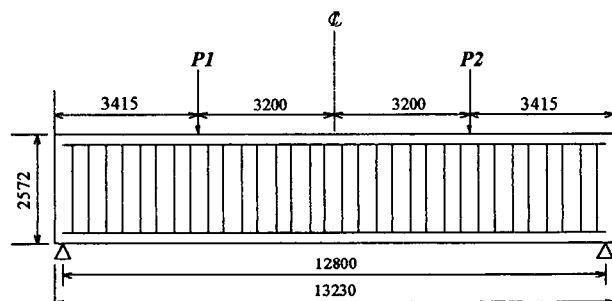


図-4 供試体の有限要素メッシュ (mm)

段配置した。式(3)の k_M とウェブの鉛直方向要素幅200mmから、リンク要素の水平ばね剛性 $k_h=360$ N/mmを得る。鋼フランジの不連続部には1要素分の隙間を設け、鋼フランジとコンクリートフランジ間は完全付着を仮定する。すなわち、鋼フランジには軸力のみを考慮する1節点2自由度の棒要素、コンクリートには1節点2自由度の平面応力要素を用い、両要素の節点座標を一致させて解析する。

本論文では許容応力以下にある実橋を想定して、波形鋼板ウェブのアコーディオン効果を2次元モデルで取扱う手法を提案し、その適用性を弾性領域の比較的小さい荷重下で行われた実験結果³⁾を用いて論じる。本提案モデルを鋼材が降伏する非線形領域にまで拡張した結果については、文献7)を参照されたい。

3.2 プレストレスの導入

上下のコンクリートフランジ内にはそれぞれ4本ずつのPC鋼より線1S21.8が配置され、1本当たり407 kNの緊張力(1300MPaの緊張応力)でフランジ全幅にほぼ一様なプレストレスが導入されている。図-5は、図-4の要素分割を用いて2

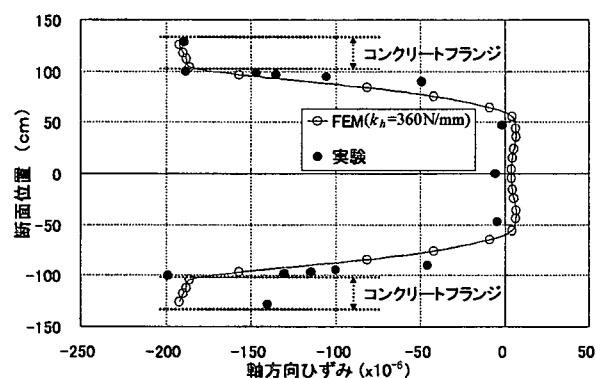


図-5 プレストレス導入時の軸ひずみ分布

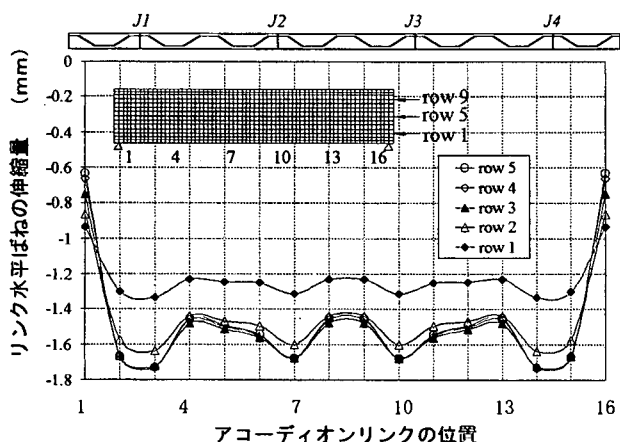


図-6 波形鋼板ウェブのアコーディオン伸縮

次元 FEM 解析により得られた、プレストレス導入時のスパン中央断面におけるコンクリートフランジ(自由端から125mmの位置)および鋼ウェブ内の軸方向ひずみ分布を、実測値と比較したものである。アコーディオン効果により波形鋼板ウェブが軸方向変形に全く抵抗しないものと仮定すれば、コンクリートフランジの導入圧縮ひずみは 224×10^{-6} となるが、実測値および解析値はウェブの抵抗によるプレストレス損失が15%程度あることを示している。

鋼板ウェブに9段配置したアコーディオンリンクのうち、下フランジに最も近いrow 1からウェブ高さ中央のrow 5までについて、水平ばねの軸方向伸縮量をプロットすれば図-6を得る。本提案モデルでは、軸方向に相隣るリンク要素間に連続的に生じるアコーディオン効果が各リンクばねの水平伸縮に集中離散化されており、図中の各折れ線が連続的なアコーディオン効果の軸方向分布形状を示している。アコーディオン効果はウェブの上下端で拘束を受け、またその軸方向分布は両端部を除いて概ね一様であるが、鋼フランジが不連続となる4ヶ所のウェブ継手位置で乱れを生じている。本解析モデルにより、波形ウェブの上下端部が軸方向変形に抵抗することによるプレストレス損失を容易に評価できる。

4. 波形鋼板ウェブ PC はりのアコーディオン効果の2次元 FEM 解析

4.1 軸方向ひずみとせん断ひずみの断面内分布

単一集中荷重 $P_1=100$ kN および対称2点集中荷重 $P_1=P_2=50$ kN の2つの載荷条件下で、スパン中央断面におけるコンクリートフランジおよび鋼ウェブの軸方向ひずみとせん断ひずみ(プレストレスによるひずみを含まない)の解析値($k_h=360$ N/mm)を実測値と比較すれば、それぞれ図-7、図-8の通りである。図中には、リンク要素の水平ばね剛性 k_h を十分大きく取ってアコーディオン効果を起こさせないようにした解析結果($k_h=\infty$)も示した。コンクリートフランジにはプレストレスが導入されているので、コンクリートは引張ひずみに十分抵抗できる。スパン中央断面では、両載荷条件の曲げモーメント値が等しくなるが、単一集中荷重下では25 kNのせん断力も同時に働くのに対し、対称荷重下ではそれが0になる。図-7および8の結果は、アコーディオン効果に起因する波形ウェブはり特有の非線形ひずみ分布とウェブ上下端近傍の急な軸方向ひずみ勾配を、本解析モデルで精度よく把握できることを示している。図-7におけるウェブのせん断ひずみ

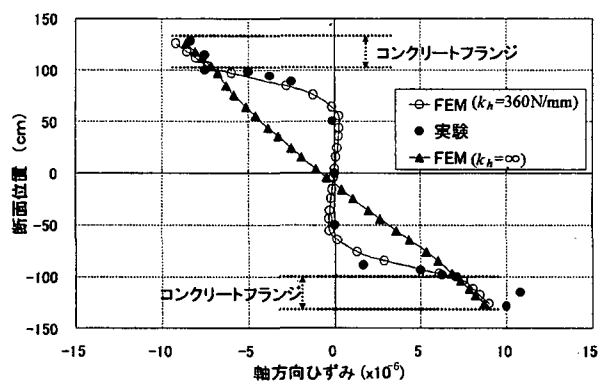


図-7 単一集中荷重 P_1 によるひずみ分布

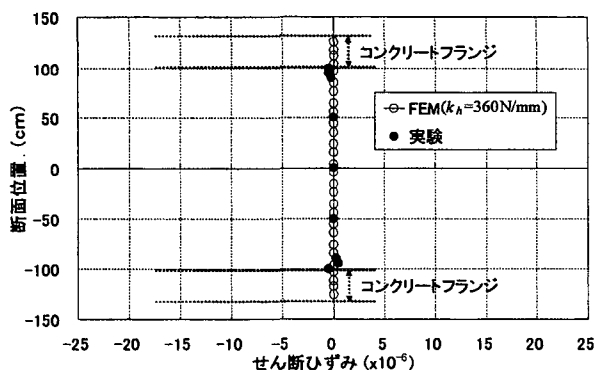
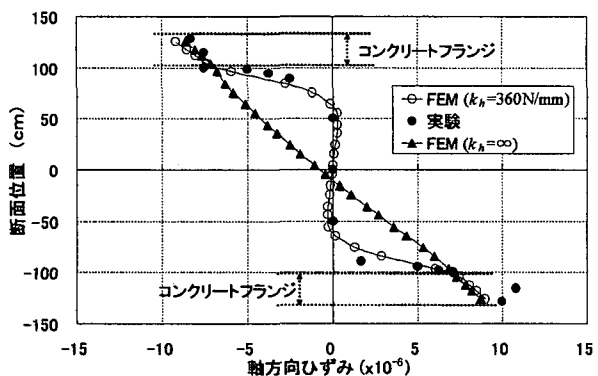
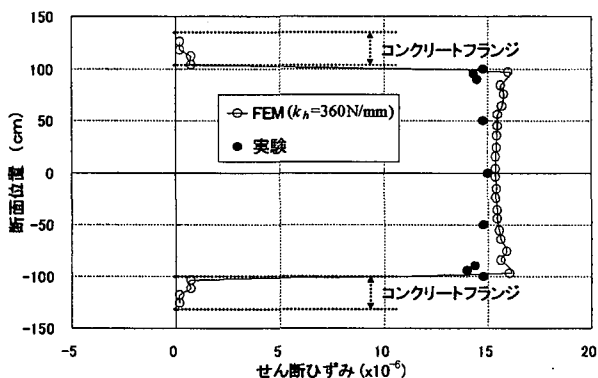


図-8 対称荷重 $P_1=P_2$ によるひずみ分布

は、せん断力 25 kN を鋼板ウェブのみで一様に負担すると仮定した値の 86% 程度であり、上下のコンクリートフランジがせん断力の 14% を負担していること、および前記仮定は波形鋼板ウェブのせ

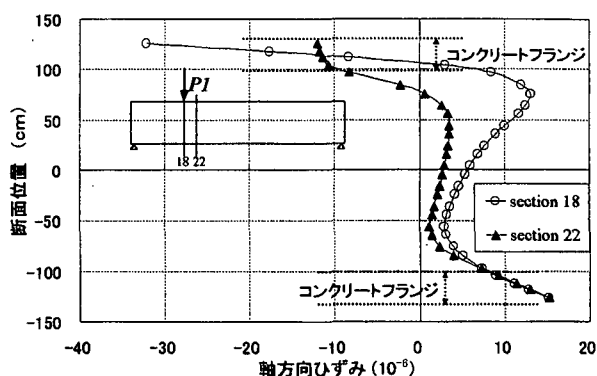


図-9 集中荷重作用点近傍断面のひずみ分布

ん断応力を十分安全に評価することが分かる。図-7および8におけるひずみの着目断面は集中荷重の作用点から十分に離れているが、その作用点近傍断面の軸方向ひずみ分布ははりの曲げ理論からかけ離れたものとなることに注意が必要である。図-9は、単一集中荷重 $P_1=100$ kN の載荷断面 (section 18) とその右隣り半波長ウェブの軸方向パネル中央断面 (section 22) における、軸方向ひずみ分布の FEM 解析値を示す。載荷断面 18 のコンクリート上フランジは局所的な正曲げモーメントを受けてその下縁に引張ひずみが生じ、右隣り断面 22 の上フランジは逆に負曲げの付加モーメントを受けている。これらの現象は集中荷重直下のウェブのせん断変形とアコーディオン効果との組み合わせに起因するもので、波形鋼板ウェブはりに関する既往の実験⁵⁾でも指摘されており、実橋ではダイヤフラム等によるウェブの補剛が必要である。なお、本供試体では図-9に対応するひずみが実測されていないが、波形鋼板ウェブをもつ PC はりの異なる供試体に本解析モデルを適用し、集中荷重作用点近傍のひずみ分布の実測値と比較した⁷⁾。

4.2 波形ウェブのアコーディオン効果

鋼板ウェブにおいて下フランジ側の row 1 から上フランジ側の row 9 まで 9 段配置したアコーディオンリンクのうち奇数段について、単一集中荷重 $P_1=100$ kN および対称 2 点集中荷重 $P_1=P_2=50$ kN に対する水平ばねの軸方向伸縮量をプロットすれば、それぞれ図-10、図-11 を得る。これらの結果から、上フランジに集中荷重を受ける波形ウェブはりのアコーディオン効果は、載荷断面とその両隣りの 1 波長ウェブに集中して起こり、それ以外の区間のアコーディオン効果によるウェブの軸方向伸縮は曲げモーメントの値と中立軸からの距離に比例することが分かる。しかし、載荷断面近傍ではむしろ中立軸 (row 5) 付近のアコー

ディオン効果が卓越し、載荷点直下の半波長ウェブは全断面にわたり正、その両隣りの1波長は負の伸縮を生じている。

単一集中荷重 $P_1=100\text{ kN}$ の場合について、載荷断面 (section 18) と右隣り1波長ウェブの軸方向パネル中央断面 (section 22, 26)、さらにスパン中央断面 (section 34) における軸方向変位の FEM 解析値を図-12 に示す。図-10 においてアコーディオン伸縮の概ね対称軸となっている荷重直下断面 18 はほぼ平面を保持しているが、その右隣

りウェブの軸方向パネル断面 22 では平面保持が成立せず、前掲図-9 のひずみ分布と図-10 のアコーディオン伸縮によく対応している。集中荷重から離れた断面 26 および 34 では鋼板ウェブ自身は平面を保っているが、そのせん断変形とアコーディオン効果のため、剛性の大きなコンクリートフランジとの合成断面としての平面保持は成立していない。

4.3 たわみに及ぼす波形ウェブのせん断変形の影響

曲げ剛性 EI 、せん断剛性 GA_w (A_w はウェブの断面積)、スパン L のはりにおいて、そのたわみに及ぼすせん断変形の影響は無次元のせん断たわみパラメータ $\lambda=EI/GA_wL^2$ に比例することが知られている⁵⁾。フランジとウェブが同一材料で構成される鋼桁橋や PC 桁橋において、その影響は数% 以内で実用的には無視される。しかし、波形鋼板ウェブ PC 桁では上下コンクリートフランジ断面積に支配される曲げ剛性 EI が大きく、薄肉鋼板ウェブのせん断剛性 GA_w が小さいため、上記せん断たわみパラメータ λ が鋼桁橋や PC 桁橋より数倍以上大きく、せん断変形の影響を必ずしも無視できない。また 2.3 で述べた波形状の幾何学的要因によるせん断剛性の低減と、ウェブのアコーディオン効果による剛性低下もあるため、初等はり理論によるたわみ計算の適用性には検証が必要である。

図-13、図-14 は単一集中荷重 $P_1=100\text{ kN}$ および2点集中荷重 $P_1=P_2=50\text{ kN}$ に対し、供試体下フランジ下面のたわみの2次元 FEM 解析値 ($k_h=360\text{ N/mm}$) と実測値をそれぞれ比較したものである。本解析モデルは供試体の剛性を高めに評価する結果となっており、コンクリートフランジと鋼板ウェブのずれ止めに用いられたアングルジベルのせん断すべりを考慮することが、解析モデルの高度化のために必要と思われる。

図中の Beam theory は、せん断変形を無視して上下コンクリートフランジ断面のみを用いた曲げ剛性に基づく初等はり理論によるたわみ曲線を示す。図-13 において、ウェブのせん断変形とアコーディオン効果が考慮された FEM 解析 ($k_h=360\text{ N/mm}$) による最大たわみは初等はり理論値の1.42倍となっている。同図中に併せてプロットした、ウェブのせん断変形のみを考慮しアコーディオン効果を考えない FEM 解析結果 ($k_h=\infty$) から、たわみに及ぼすアコーディオン効果の影響は小さく、ウェブのせん断変形による付加たわみが卓越することがわかる。なお、はりのせん断力をすべてウェブのみで負担すると仮定して、せん

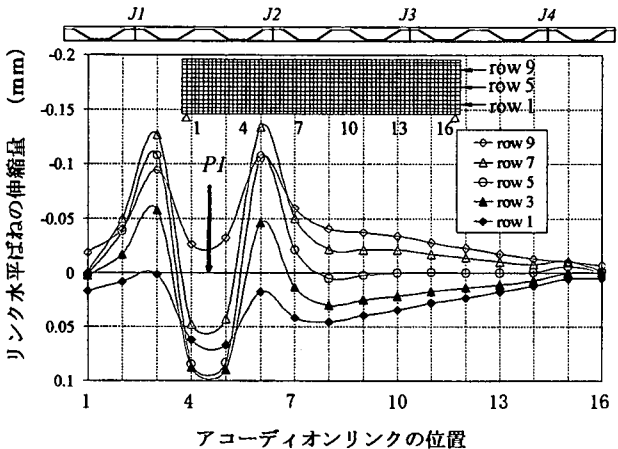


図-10 単一集中載荷時のアコーディオン伸縮量

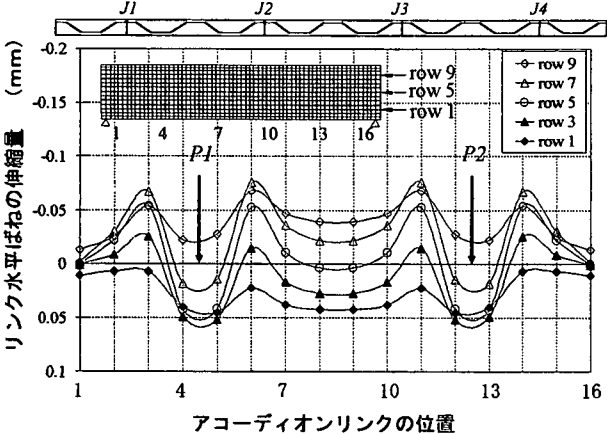


図-11 対称載荷時のアコーディオン伸縮量

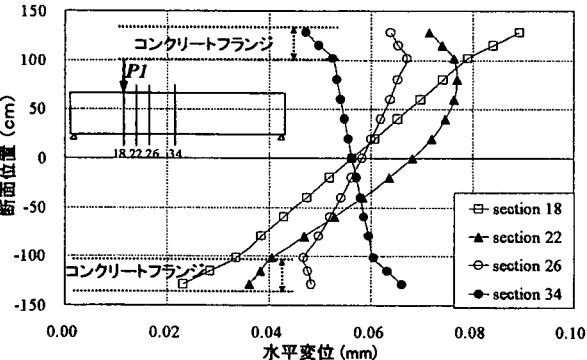


図-12 はり断面の軸方向変位

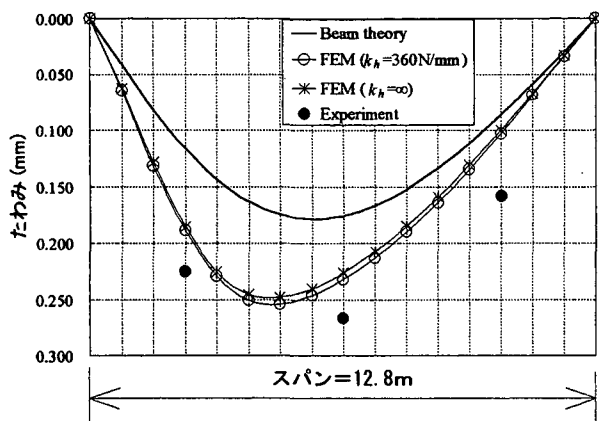


図-13 単一集中荷重 P_1 によるたわみ

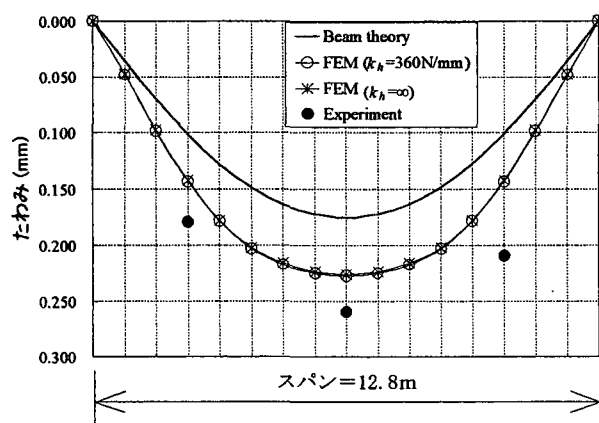


図-14 対称荷重 $P_1=P_2$ によるたわみ

断変形を考慮する Timoshenko はり理論を用いると過大なたわみを与える³⁾ので、波形ウェブ橋においてはウェブとフランジのせん断力分担率が設計上の検討事項となる。

一般に、はりのせん断変形による付加たわみはウェブ高さ H とスパン L の比の二乗 $(H/L)^2$ に比例し、本供試体の場合 $H/L=1/6.4$ であることがせん断変形の影響を増幅している。波形ウェブ PC 橋に平衡張出し架設を適用する際、張出し長が比較的短い状態でのたわみ管理には、せん断変形による付加たわみを無視できないことに注意を要する。

4.4 ウェブの補剛による局所的アコーディオン効果の拘束

4.1 および 4.2 において、フランジに集中荷重が作用する波形ウェブはりではアコーディオン効果が荷重断面とその両隣りの 1 波長ウェブに集中し、コンクリートフランジに正負の局所的付加曲げモーメントが生じることを示した。フランジに対する集中外力の作用は、連続桁の中間支点や斜張橋・エクストラードード橋のケーブル定着部でも起こるものであり、剛なダイヤフラム等によるウェブの補強が必要となる。

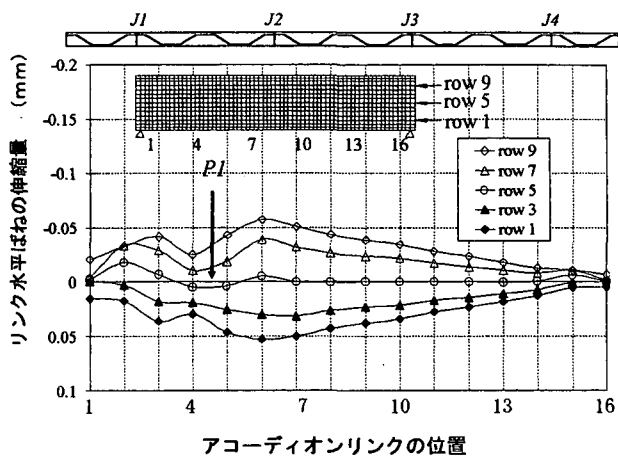


図-15 荷重断面ウェブを補剛後のアコーディオン伸縮量

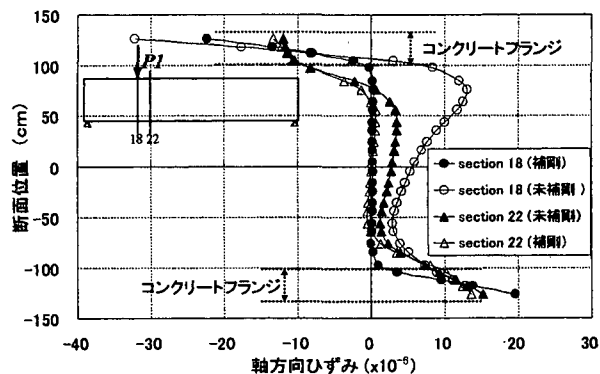


図-16 荷重断面ウェブを補剛前・後のひずみ分布

いま、単一集中荷重 $P_1=100$ kN が作用する場合に、荷重断面のウェブをダイヤフラムで補剛すると想定し、荷重点直下の波形ウェブ軸方向パネルのヤング係数のみを十分大きく与えて解析を行った。図-15 は、前掲図-10 に対応させて補剛後のアコーディオンリンク水平ばねの軸方向伸縮量をプロットしたものである。図-15 は、想定したウェブの補剛が集中荷重荷重断面近傍の局所的アコーディオン伸縮の抑制に極めて効果的であること、特に無補剛時に卓越した中立軸付近のアコーディオン伸縮がほぼ 0 になることを示している。また、図-16 に示す補剛前・後の荷重断面 (section 18) とその右隣り半波長ウェブ断面 (section 22) における軸方向ひずみ分布の比較から、荷重断面ウェブの補剛によりコンクリート上フランジの局所的付加曲げモーメントが著しく低減し、補剛前の荷重断面 18 において上フランジ下縁に生じた引張ひずみは消失することが分かる。

5. 結語

波形鋼板ウェブをもつ PC 桁橋を合理的、経済

的に設計・施工するためには、ウェブのアコーディオン効果を力学的に正しく理解することが不可欠である。また、この構造のスパンを長大化して斜ケーブルを併用した斜張橋やエクストラード橋の設計に際し、波形ウェブの各板パネルに多自由度のシェル要素を用いる3次元FEM解析に頼ることは実用的でない。この観点から、加藤ら⁶⁾の提案する拡張はり理論は、1次元のはり理論により波形鋼板ウェブ橋のせん断変形挙動を考慮できる有用かつ実用的なものであるが、波形ウェブに特有のアコーディオン伸縮挙動とウェブ断面の非線形ひずみ分布を取扱うことはできない。本論文に提示したアコーディオンリンクは、波形ウェブの3次元アコーディオン効果の本質を簡易で実用的な2次元解析によりシミュレートできるようにしたものである。せん断ひずみエネルギーの考察から、波形ウェブに固有のせん断剛性低減効果をも定式化した。この解析手法の精度と有用性は、波形鋼板ウェブをもつPCはりの大型供試体の載荷試験データとの比較により明らかにした。

波形鋼板ウェブをもつPC桁の設計はアコーディオン効果を考慮してウェブの抵抗を無視し、上下のコンクリートフランジ断面のみを用いたはり理論により行われている。しかし本論文に示したように、ずれ止め等を介してコンクリートフランジが接合されるウェブの上下端近傍はプレストレス導入に抵抗しており、また主桁の曲げに際してのせん断変形による付加たわみ、ウェブ上下端部の高さ方向の急なひずみ勾配と応力集中、集中荷重作用点近傍のコンクリートフランジの大きな付加曲げモーメントなどに注意が必要である。

終わりに、本研究で引用したPCはり供試体の

実験データを提供頂いたオリエンタル建設(株)第二技術部の阿田芳久氏に、深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 角谷 務: 今後のPC橋の将来展望-波形鋼板ウェブPC箱桁橋への展開-, プレストレストコンクリート技術協会 第10回シンポジウム論文集, pp.7-15, 2000.
- 2) 山口恒太, 山口隆裕, 池田尚治: 波形鋼板をウェブに用いた複合プレストレストコンクリート桁の力学的挙動に関する研究、コンクリート工学論文集, 第8巻第1号, pp.27-40, 1997.
- 3) 阿田芳久, 落合 勝, 溝江慶久, 町田文孝: 波形鋼板ウェブPC橋の実物大模型試験体を用いた静的載荷・疲労試験, プレストレストコンクリート, Vol. 43, No. 4, pp.72-81, 2001.
- 4) 今泉安雄, 中村和典, 藤木慶博, 三浦泰博: 張出し架設工法による全外ケーブル方式波形鋼板ウェブPC橋の設計・施工, プレストレストコンクリート, Vol. 43, No. 3, pp.42-48, 2001.
- 5) 山崎正直, 内田宗武, 御子柴光春: 波形鋼板ウェブのせん断変形を考慮したコンクリートスラブの設計法の提案, プレストレストコンクリート技術協会 第8回シンポジウム論文集, pp.25-30, 1998.
- 6) 加藤久人, 川畑篤敬, 西村宣男: 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変位と断面力の実用計算法, 土木学会論文集 No.703/I-59, pp.293-300, 2002.
- 7) N. Tapankeaw, L. Huang and H. Hikosaka: Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Beam with Corrugated Steel Web, Proceedings of the 4th International Summer Symposium, JSCE, 2002.

(2002年4月19日受付)