波形鋼板ウェブ断面の残留応力測定

久保 全弘¹・渡辺 孝一²

¹フェロー 名城大学教授 理工学部社会基盤デザイン工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

E-mail: kubo@meijo-u.ac.jp

²正会員 名城大学准教授 理工学部社会基盤デザイン工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

E-mail: koichi@meijo-u.ac.jp

本論文は、波形鋼板ウェブ断面の残留応力を実測し、平鋼板と比較して考察したものである。フランジ無しのウェブ部材と上下フランジを溶接した部材を6体ずつ製作し、応力開放法により残留応力を実測した。波形の形状は台形とし、断面の波高とパネル幅の組合せを変化させた。測定結果から、フランジを溶接しない波形鋼板ウェブ断面の残留応力はプレス加工の影響を受けるため様な分布形ではないが、降伏点応力の10%以内で変化する。一方、フランジを溶接した断面の残留応力分布は、ウェブ上下縁からウェブ高の20%程度の範囲で急激に変化するが、ウェブ内部では降伏点応力の2%程度の一様な引張応力である。波形鋼板ウェブの残留応力分布は、フランジとの溶接時にウェブが主桁軸方向に伸縮するため、平鋼板の場合と比較して相異なることを明かにした。

Key Words : residual stress, corrugated steel web plate without and with flanges, method of sectioning, longitudinal and transverse stresses

1. 緒言

波形鋼板ウェブPC橋は、従来のPC橋のコンクリートウェブを軽量の波形鋼板で置き換えることで、自重の大幅な軽減を図り、スパンの長大化と施工の省力化を可能にした橋梁形式である¹⁾。国内では1993年に完成した新開橋を最初の適用事例として、現在までに200橋以上が架設されている。既往の研究¹⁾から、波形鋼板ウェブは高いせん断強度を有し、しかもアコーディオン効果が期待でき、軸方向力や曲げモーメントにほとんど無抵抗となる力学的特性が確認されてきた。著者も波形鋼板ウェブ桁の面内曲げ性能²⁾、横ねじれ座屈性能³⁾およびせん断座屈性能⁴⁾について実験ならびに解析的に検討してきた。

本研究は波形鋼板部材の製作過程に発生する残留応力を実測し、構造解析に必要な初期不整⁵⁾としての情報を提供するものである。既往の研究は数少なく、藤村ら⁶⁾は実物大の供試体を用いて、フランジ付き波形鋼板ウェブ断面の残留応力を応力開放法と磁歪法を用いて比較した。その結果、ウェブとフランジの接合辺から内部に向かって引張→圧縮→引張と応力状態が変わり、一般のプレートガーダーの溶接による残留応力分布と異なることを示した。また、ウェブの表裏で応力に差があり、製作過程で大きな曲げが発生していることを確認した。しかし、残留応力の分布形状とその大きさについては具体的

には明らかにしていない。小沼ら⁷⁾は固有応力法を利用して波形鋼板ウェブの溶接部付近の残留応力分布を解析から推定している。阿田ら⁸⁾は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において、プレートガーダーの従来型すなわち、フランジとの接合線で降伏点応力 F_y 相当の引張応力、ウェブ高さの中央方向へ $-0.1F_y$ の圧縮応力へと変化する分布と文献⁶⁾の測定結果を参考にした残留応力モデルを仮定してせん断座屈耐力に関する解析を行った。その他、溶接残留応力を仮定し波形鋼板ウェブの非線形せん断座屈解析を行った研究^{9), 10)}がある。

本研究では、フランジ無しと上下フランジを有する波形鋼板ウェブ断面の残留応力分布を応力開放法により測定する。供試体は波形の形状を台形とし、断面を構成する波高とパネル幅比を変化させた10体と、比較のため同一断面諸元を有する平鋼板2体を加えた合計12体の実測結果を用いる。波形鋼板材の軸方向のウェブパネル（以降、「軸方向パネル」と呼ぶ）と、軸線に対して斜方向パネルの残留応力を平鋼板の測定値と比較することで、ウェブとフランジの溶接の影響を分析する。また、平鋼を波形へ成形する冷間加工の影響についても検討する。

表-1 波形鋼板ウェブの実験供試体

実験供試体		h_r	a	b	c	c/a	$\gamma=q/s$
フランジ無	フランジ付	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
CR0	CRF0	0	-	-	-	-	1.000
CR20	CRF20	20	81.3	78.8	81.3	1.00	0.985
CR40A	CRF40A	40	85.0	75.0	85.0	1.00	0.941
CR40B	CRF40B	40	117.2	42.8	58.6	0.50	0.910
CR40C	CRF40C	40	67.3	92.7	101.0	1.50	0.951
CR60	CRF20	60	91.3	68.8	91.3	1.00	0.877

Note: $q=2(a+b)$, $s=2(a+c)$

図-1 波形鋼板ウェブの供試体とひずみゲージ測定位置

写真-1 プレス加工

写真-2 フランジの溶接

2. 測定内容

(1) 供試体

供試体は表-1に示すようにフランジ無し (CR) とフランジ付 (CRF) の波形鋼板ウェブ部材を用意した。図-1はフランジ付き波形鋼板ウェブの断面寸法を示す。供試体は、ウェブ高さ $d_w=320\text{mm}$ 、ウェブ厚さ $t_w=3.2\text{mm}$ 、フランジ幅 $b_f=120\text{mm}$ 、フランジ厚さ $t_f=8.0\text{mm}$ を同一に選び、波形鋼板ウェブの形状を台形とした台形の波長 q と辺長 s は、次式で表される。

$$q = 2(a+b) \quad (1)$$

$$s = 2(a+c) \quad (2)$$

ここに、 a は軸方向パネル幅、 c は斜方向パネル幅 (b は c の投影幅) である。本研究では表-1に示すように波高 h_r を $h_r=0$ (平鋼板)、20、40および60mmに変化させ、さらに $h_r=40\text{mm}$ では、腹板の斜方向と軸方向パネル幅の比を $c/a=1.0, 0.5, 1.5$ の3種類に変化させた。鋼板ウェブ

の形状比を次のパラメータで表す。

$$\gamma = q/s \quad (3)$$

表-1のように、本供試体は $\gamma=1.00\sim0.88$ の範囲で変化する。部材長は波長の3倍 ($L=3q=960\text{mm}$) とした。

供試体の製作は原板からシアー切断で板取りし、ウェブ厚の約2倍の半径 $R=6\text{mm}$ のポンチを用いてV字型曲げでプレス成形した。溶接組立は半自動溶接 (電流 160amp, 電圧 23volt, 速度 $v=10\text{mm/sec}$) により、ウェブに適用した鋼板の板厚を考慮して脚長3mmのすみ肉溶接で接合した。写真-1, 2に波形鋼板のプレス加工と溶接組立の状況を示す。

供試体に使用した鋼板は、すべて鋼種SS400を使用して製作した。鋼材の引張試験結果を表-2に示す。なお、鋼フランジを有する波形鋼板ウェブ橋の施工実績¹⁾の範囲では、ウェブ厚は9mm以上であり、その板厚の1.3～2.2倍のフランジ厚が用いられている。本実測の供試体はウェブ厚の2.5倍のフランジを用いており、実橋とは溶接条件や溶接脚長が異なる。

表-2 実験供試体に使用した鋼材の引張試験結果

供試体	使用鋼板 (設計板厚)	降伏点応力 F_y (MPa)	引張強さ F_u (MPa)	ヤング率 E (GPa)	ポアソン比 ν	伸び Δl (%)
CRシリーズ	Web plate (3.2mm)	302	457	208	0.29	26
CRFシリーズ	Web plate (3.2mm)	277	418	204	0.28	26
	Flange plate (8.0mm)	280	426	200	0.29	32

(2) 残留応力の測定方法

残留ひずみの測定は各供試体の部材長さ L (波形3波長分)から、中央1波形部分を対象として、図-1, 2のように[1]軸方向パネルの中央部、[2]斜方向パネル中央部の2断面と、上下フランジの表裏(CRFシリーズ)について行った。測定断面の表裏に弾性単軸ゲージ(ゲージ長3mm)を部材の軸方向(x方向)および垂直方向(y方向)に貼付け、波形による拘束効果を失わず、また、急激な温度変化が生じないように慎重に機械的切断で応力開放を行った。切断順序は、先ず部材長さ L から1波長 $q=320$ mmの長さに切断し、次にフランジとウェブをすみ肉溶接ビードに沿って切り離して3分割した(写真-3(a))。続いて、ウェブの軸方向と斜方向パネルを切り離して幅50mm~70mmの短冊状とし、最後に細片に分割した(写真-3(b))。

応力開放法に基づく残留応力 σ_r は、測定した残留ひずみ ε_r と表-2に示した鋼板の実測ヤング率 E およびポアソン比 ν を用いて、次式(4)および(5)から求めた。

$$\sigma_r = E\varepsilon_r \leq F_y \quad (4)$$

なお、一部の供試体は、軸方向(x方向)と直交方向(y方向)のゲージを近接して貼り付けた。このゲージから得たひずみより平面応力状態として求めた残留応力は以下の式(5)による。

$$\sigma_{rx} = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \leq F_y \quad (5a)$$

$$\sigma_{ry} = \frac{E}{1-\nu^2}(\nu\varepsilon_x + \varepsilon_y) \leq F_y \quad (5b)$$

これら残留応力の測定結果は、表-2に示す鋼板の降伏点応力 F_y を用いて無次元化した値(σ_r/F_y)で表す。

3. 測定結果

(1) フランジ無し(CRシリーズ)の場合

a) 平鋼板ウェブの残留応力分布

図-3(a)は平鋼板ウェブ(供試体CR0)の部材軸方向(x方向)の残留応力 σ_{rx} を図示したものである。縦軸はウェブの無次元化高さである。残留応力は、ウェブパネル表裏の測定値をプロットした。また、各ゲージ貼付位置に対して、その平均値を実線の直線で結び示した。

図-2 フランジのひずみ測定位置(CRF40)

(a) 切断の状況

(b) 細片分割の状況

写真-3 実験試験片加工状況

図-3(a) 平鋼板ウェブ(CR0), 部材軸方向(x方向)の残留応力分布

図-3(b) 平鋼板ウェブ(CR0), 垂直方向(y方向)の残留応力分布

図-4(a) 波形鋼板ウェブ(CR40A), 軸方向パネル (x 方向) の残留応力分布

図-4(b) 波形鋼板ウェブ(CR40A), 軸方向パネル (y 方向) 波高 40mm の残留応力分布

図-5(a) 波高を変化させた場合の軸方向パネル (x 方向) の残留応力分布

図-5(b) 波高を変化させた場合の軸方向パネル (y 方向) の残留応力分布

残留応力分布は上下縁の近傍で引張応力 $0.03F_{yw}$ 程度であり、ウェブ高さの内部では圧縮応力 $0.06F_{yw}$ 程度となっている。ウェブ高さ中央 $0.5d_w$ の測定点は、部材の細片加工順の影響により切断時に板曲げが作用し、表裏の差が大きいため考察から除外する。また、本実測供試体は薄肉部材のため過去の研究^{5,12)}にならい、曲げを無視して残留応力を推定する。平鋼板ウェブの垂直方向 (y 方向) の残留応力 σ_y の測定結果を図-3(b)に示す。残留応力はウェブ高さの内部ではほぼ0である。このように、シア切断した鋼板の残留応力は、ガス切断した鋼板^{5,12)}に比べて小さいことがわかる。また、図-3(a), (b)を式(5)による平面応力状態として算定した残留応力をplane stressとして一点鎖線で示した。平面応力状態を考慮しても式(4)の部材軸方向の算定値と大差ないことがわかる。

b) 波形鋼板ウェブの軸方向パネルの残留応力分布

図-4(a)は、波形鋼板ウェブCR40A (波高40mm, $c/a=1$) の軸方向パネルにおける部材軸方向の残留応力 σ_x である。残留応力の表裏の差はウェブ高さの中央部 $0.5d_w$ で小さく、上下縁に近くなるほど大きい。分布形は、上下縁からウェブ高さ d_w の約4割の領域で引張応力、ウェブ高さの中央部2割で圧縮応力になっている。残留応力の絶対値は引張、圧縮とも $0.04F_{yw}$ 程度である。

図-4(b)は、波形鋼板ウェブCR40Aの軸方向パネルの垂直方向の残留応力 σ_y を示す。残留応力の表裏の差も小さく、 $0.03F_{yw}$ 程度のわずかな圧縮残留応力がウェブ高さにわたって均一に分布している。

また、図-4(a), (b)について、それぞれ平面応力状態と

して算定した残留応力をplane stressとして一点鎖線で示しているが、平面応力状態を考慮しても部材軸方向の算定値と大差ないことがわかる。これらより本論文では、式(4)によって残留応力を算定し検討を進める。

図-5(a)は、斜方向と軸方向のパネル幅の比を $c/a=1$ として、波高を3種類に変化させた場合の部材軸方向の残留応力 σ_x を比較したものであり、鋼板表裏のひずみの平均値で図示している。ウェブ高さの中央部が相異した分布を示しているが、波高が大きくなるにつれて、ウェブ高さ方向に様な応力分布となる傾向がみられる。波高が大きくなっても残留応力の絶対値は $0.1F_{yw}$ 以下であり無視できるほど小さい。

図-5(b)は波高を3種類に変化させた場合の軸方向パネルの垂直方向の残留応力 σ_y である。波長の小さいCR20の上下縁で符号が逆となるなど残留応力に乱れがみられるが、残留応力の絶対値は $0.1F_{yw}$ 以下であり小さい。

図-6(a)は、波高を $h_r=40$ mm一定にして斜方向と軸方向パネル幅の比 c/a を3種類に変化させた場合の部材軸方向の残留応力 σ_x を比較したものである。ウェブ高さの中央部で相異した分布を示しているが、残留応力の値は $0.1F_{yw}$ 以下である。全般に引張側の残留応力が卓越する分布形をしている。

図-6(b)はパネル幅比を変化させた場合の垂直方向の残留応力 σ_y を示す。残留応力の値は $0.06F_{yw}$ 以下で図-6(a)と反対に圧縮側の残留応力が卓越する残留応力を示している。

図-6(a) パネル幅比を変化させた場合の軸方向パネル (x 方向) の残留応力分布

図-6(b) パネル幅比を変化させた場合の軸方向パネル (y 方向) の残留応力分布

図-7(a) 波高を変化させた場合の斜方向パネル (x 方向) の残留応力分布

図-7(b) 波高を変化させた場合の斜方向パネル (y 方向) の残留応力分布

図-8(a) パネル幅比を変化させた場合の斜方向パネル (x 方向) の残留応力分布

図-8(b) パネル幅比を変化させた場合の斜方向パネル (y 方向) の残留応力分布

c) 波形鋼板ウェブの斜方向パネルの残留応力分布

図-7(a)は波高を3種類に変化させた場合の斜方向パネルで測定した部材軸方向 (x方向) の残留応力分布である。図-6(a)の軸方向パネルと同様に引張残留応力が大きい分布をしている。とくに波高60mm (CR60) では、圧縮側の残留応力が生じていない。

図-7(b)は垂直方向 (y方向) の残留応力分布を示す。図-5(b)の軸方向パネルの分布と類似している。

図-8(a)は、波高を $h_r=40\text{mm}$ 一定にして斜方向と軸方向パネル幅の比 da を3種類に変化させた場合の部材軸方向の残留応力 σ_x である。部分的に $0.1F_{yw}$ を超えた値があるが、図-6(a)の軸方向パネルと類似した分布形をしている。

図-8(b)は斜方向パネルの垂直方向の残留応力 σ_y であり、図-6(b)で示した軸方向パネルの分布に比べて上下縁で変

化が大きい、概ね図-6(b)と類似した分布形である。

以上のように、フランジを溶接しない波形鋼板の軸方向および垂直方向の残留応力分布は、波高やパネル幅比の変化でわずかに変化するものの、大きくても鋼板の降伏点応力 F_y の10%以内である。また、ウェブの斜め方向パネルについても軸方向と同様の傾向であり、プレスによる残留応力は折り曲げ局所部を除いて、平鋼板桁と同等のレベルとして良いと推察される。

(2) フランジ付き (CRFシリーズ) の場合

a) 平鋼板ウェブ断面の残留応力分布

図-9(a)、図-9(b)はフランジ付き平鋼板ウェブ断面CRF0の部材軸方向 (x方向) の残留応力 σ_x を示す。図-9(a)に示すように、ウェブの部材表裏における応力差は

図-9(a) フランジ付き平鋼板ウェブ (CRF0) 部材軸方向 (x 方向) の残留応力分布

図-9(b) 平鋼板ウェブ (CRF0) のフランジ 部材軸方向 (x 方向) の残留応力分布

図-9(c) フランジ付き平鋼板ウェブ (CRF0) 垂直方向 (y 方向) の残留応力分布

図-10 フランジ付き波形鋼板ウェブ (CRF40A) 軸方向パネル (x 方向) の残留応力分布

図-11(a) 波高を変化させた場合の軸方向パネル ウェブ (x 方向) の残留応力分布

図-11(b) 波高を変化させた場合の軸方向パネル フランジ (x 方向) の残留応力分布

高々 $0.1F_{yw}$ 程度で小さく、溶接形断面の典型的な残留応力分布形^{5,12)}が得られている。ウェブ内部の圧縮残留応力は $0.3F_{yw}$ 程度、上下フランジ溶接線近傍の引張残留応力は $0.6F_{yw}$ 程度である。また、図-9(b)では、上下フランジの部材軸方向 (x 方向) の残留応力 σ_x に着目する。図中にはフランジ幅方向を縦軸としたときのウェブとの接合位置を一点鎖線で示している。上下フランジの残留応力分布はほとんど同様であり、圧縮残留応力は $0.35F_{yf}$ 程度および引張残留応力は $0.6F_{yf}$ 程度が生じている。

図-9(c)は平鋼板ウェブの垂直方向 (y 方向) の残留応力 σ_y を示す。図-9(a)の分布形と逆の分布形状を示し、ウェブ内部の引張残留応力は平均で $0.06F_{yw}$ 、上下縁の圧縮残留応力は $0.3F_{yw}$ を示している。また、図-9(a)、図-9(c)のひずみ測定値から平面応力状態と仮定した残留応力分布を表示し比較しているが分布性状に大差はない。このように、フランジを溶接した断面の残留応力は、前

掲した図-3(a)、図-3(b)のフランジ無しの場合に比べて残留応力が大きく、溶接による残留応力の影響が顕著であることがわかる。

b) 波形鋼板ウェブ軸方向パネル断面の残留応力分布

図-10は、フランジ付き波形鋼板ウェブCRF40A (波高 $h=40\text{mm}$, $c/a=1$) の軸方向パネルにおける部材軸方向 (x 方向) の残留応力 σ_x である。アコーディオン効果により、図-9(a)の平鋼板と比較して残留応力の表裏の差がウェブ上下のフランジ縁で大きく、フランジを溶接したことで板曲げの作用が影響していると思われる⁹⁾。残留応力の分布形は、上下フランジ縁で平均 $0.3F_{yw}$ 程度の引張応力、ウェブ内部では平均 $0.04F_{yw}$ の圧縮応力で0に近く小さい。

図-11(a)は波高を3種類に変化させた波形鋼板ウェブの残留応力分布を比較したものである。上下フランジ縁の引張応力は波高によって相異しているが、ウェブ内部の

図-12(a) パネル幅比を変化させた場合の軸方向パネルウェブ (x方向) の残留応力分布

図-12(b) パネル幅比を変化させた場合の軸方向パネルフランジ (x方向) の残留応力分布

図-12(c) パネル幅比を変化させた場合の軸方向パネルウェブ (y方向) の残留応力分布

図-13(a) 波高を変化させた場合の斜方向パネルウェブ (x方向) の残留応力分布

図-13(b) 波高を変化させた場合の斜方向パネルフランジ (x方向) の残留応力分布

図-14(a) パネル幅比を変化させた場合の斜方向パネルウェブ (x方向) の残留応力分布

図-14(b) パネル幅比を変化させた場合の斜方向パネルフランジ (x方向) の残留応力分布

残留応力は $0.05F_{yw}$ 以下と小さく、あまり変化していない。

図-11(b)は、図-11(a)に示した波高を3種類に変化させた波形鋼板ウェブに連結したフランジの残留応力分布を比較したものである。波高が大きくなるにつれウェブの取り付け位置がフランジ幅の中央からずれるため突出幅が狭い側で圧縮残留応力が大きくなり、広い側では小さく、偏った分布形をしていることがわかる。波形のウェブ線の引張残留応力は波高が大きくなるにつれて小さくなり、前掲の図-9(b)に示した平鋼板ウェブの値 ($0.6F_{yf}$ 程度) と比較して波高 $h=20\text{mm}$ で93%、 $h=40\text{mm}$ で56%、 $h=60\text{mm}$ で40%を示している。

図-12(a)、図-12(b)は波高を $h=40\text{mm}$ に一定にして斜方向と軸方向パネル幅の比 cla を3種類に変化させた場合の軸方向パネル断面における部材軸方向 (x方向) の残留応力 σ_{rx} である。これらの図から軸方向パネル断面のウェ

ブおよびフランジの残留応力分布は、 cla 比の影響をあまり受けていないことがわかる。

図-12(c)は、図-12(a)に示した軸方向パネル断面のウェブ垂直方向 (y方向) の残留応力 σ_{ry} を示す。残留応力の

値は軸方向パネル幅が小さいCRF40C ($cla=1.5$) の供試体で小さく、他の二つの供試体CRF40A, CRF40Bでは上下縁で大きく、 $0.3F_{yw}$ 程度が生じている。

c) 波形鋼板ウェブの斜方向パネル断面の残留応力分布

図-13(a), 図-13(b)は図-1に示す斜方向パネルの中央で測定した部材軸方向の残留応力分布である。ウェブについては、図-11(a)に示した軸方向パネルの残留応力分布と同様の傾向である。フランジについては、波高が変化してもフランジ幅の中央でウェブ溶接線と斜めに交差するため、フランジ幅の中心線に関して線対称な残留応力分布を示している。波高を3種類に変えているが応力値に大きな相違はなく、図-9(b)の平鋼板 ($h=0$) と比較すると、フランジ幅中央における引張残留応力は半分程度に小さく、フランジ幅両端における圧縮残留応力は2倍程度に大きくなっている。

図-14(a), 図-14(b)は波高を $h=40\text{mm}$ に一定にして斜方向と軸方向パネル幅の比 cla を3種類に変化させた場合の測定結果である。これらの図からも軸方向パネル断面のウェブの残留応力分布は、 cla 比の影響をあまり受けていないことがわかる。

4. 考察

(1) 残留応力のレベル

波形鋼板ウェブ断面の残留応力のレベルは、フランジ無しの場合は3.(1)に示したように降伏点応力 F_{yw} の約10%以内で変化し、一様な分布形状をしていない。これに対し、フランジ付きの場合は3.(2)に示したように、波高 h の大きさによって多少変化し、とくにフランジの残留応力分布に大きな変化が認められる。

ここでは、フランジ付き (CRFシリーズ) の測定結果を用いて、波形鋼板ウェブ断面の残留応力のレベルを検討する。

図-15(a), 図-15(b)は、軸方向パネルと斜方向パネルのウェブ断面における部材軸方向の残留応力レベル σ_{rx}/F_{yw} を示す。図の横軸は式(3)のウェブの形状比 γ として、平鋼板ウェブ ($\gamma=1.000$) を含む6種類の供試体の結果をプロットした。ウェブ断面は、上下フランジ縁 ($0.95d_w$, $0.05d_w$) の平均値を「edges」、上下フランジ縁からややウェブ内側寄りの内部点 ($0.81d_w$, $0.19d_w$) の平均値を「内部点1 (inner1)」、ウェブ高さ中央寄りの内部点 ($0.67d_w$, $0.5d_w$, $0.33d_w$) の平均値を「内部点2 (inner2)」として整理した。

図-15(a)から、上下縁の応力レベルは平鋼板の引張応力0.6に対して波高を大きくしても50%の0.3である。ウェブの内部点1では圧縮応力、内部点2では引張応力であるが、いずれも0.05以内の小さい応力レベルである。このように、ウェブ内部での残留応力は平鋼板の圧縮応力

図-15(a) フランジ付き波形軸方向パネル、ウェブの残留応力レベル

図-15(b) フランジ付き波形斜方向パネル、ウェブの残留応力レベル

図-16(a) フランジ付き波形軸方向パネル、フランジの残留応力レベル

図-16(b) フランジ付き波形斜方向パネル、フランジの残留応力レベル

0.26に対してかなり小さく、アコーディオン効果の影響であることがわかる。図中には、最小二乗法を用いて実測値に対する応力レベルの算定式 $\bar{\sigma}$ を与えている。なお、残留応力分布はわずかな波高でも平鋼板と異なる分布となるため、本論文で提案する $\bar{\sigma}$ は全て平鋼板ウェブ $\gamma=1.000$ の値を除外して推定している。

図-15(b)は、図-15(a)と同様な残留応力レベル σ_{rx}/F_{yw} を斜方向パネルについてプロットした結果を示す。上下縁の応力レベルは平鋼板の引張応力0.6に対して波高 $h=20\text{mm}$ ($\gamma=0.985$) では0.5とわずかに小さくなり、波高 $h=40\text{mm}$ ($\gamma=0.941$) 以下では50%の0.3のまわりを変動している。ウェブの内部点の応力レベルは波高 $h=20\text{mm}$ ($\gamma=0.985$) では内部点1では0.06、内部点2では0.01の圧縮応力を示し、 γ がそれ以上となると図-16(a)の軸方向パネルと同様に応力レベル0.05以内に小さくなる。応力レベルの算定式 $\bar{\sigma}$ は、軸方向パネルと同様にウェブ上下縁では直線式、内部点1、2では一定値で表示できる。

図-16(a)、図-16(b)は、フランジの部材軸方向の残留応力レベル σ_{rx}/F_y を調べたものである。図-16(a)は図-15(a)に示した軸方向パネルのウェブに溶接接合されていたフランジの応力レベルを示している。波高の変化によりウェブとの溶接線がフランジ幅中央位置から片側にずれることから、フランジ端の圧縮応力レベルは γ とともに突出幅の狭い側で直線的に大きくなり、広い側では直線的に小さくなっている。例えば波高 $h=60\text{mm}$ ($\gamma=0.877$) の残留応力レベルについて、平鋼板 ($\gamma=1.000$) と比較すると、狭い側では230%増加し、広い側では30%減少する。また、ウェブとの接合線上では平鋼板の残留応力レベル0.6から γ とともに直線的に小さくなり、波高 $h=60\text{mm}$ ($\gamma=0.877$) で0.3を示している。応力レベルの算定式 $\bar{\sigma}$ は、溶接線上およびフランジ端とも図中に示す直線式で与えられる。

図-16(b)は図-15(b)に示した斜方向パネルのウェブに連結したフランジの残留応力レベルを示している。波高が変化してもウェブの溶接線はフランジ幅の中央で交差するため、フランジ両端の圧縮応力レベルは γ と無関係に0.3付近で変動している。また、フランジ幅の中央(ウェブとの接合位置)における引張応力レベルは0.2付近で変動している。応力レベルの算定式 $\bar{\sigma}$ は、溶接線上およびフランジ端とも図中に示すように直線式で与えられる。

(2) プレス加工による残留応力

本研究ではフランジ無し (CRシリーズ) の場合の測定結果を用いて、波形鋼板 (CR20, CR40, CR60) の残留応力値から平鋼板 (CR0) の値を差し引いた値が波形成形のプレス加工で生じる残留応力であると仮定し、考察する。

図-17(a) 波形軸方向パネル、プレス加工による残留応力分布

図-17(b) 波形軸方向パネル、プレス加工による残留応力分布

図-18(a) 波形斜方向パネル、プレス加工による残留応力分布

図-18(b) 波形斜方向パネル、プレス加工による残留応力分布

図-17(a)、図-17(b)は軸方向パネルの結果であり、波高 h_r 、波形の形状 c/a の大きさに関係なく残留応力レベル $\sigma_{rx}/F_{yw}=0.15$ 以内であり、引張応力が大きい分布形をして

いる。

図-18(a), 図-18(b)は斜方向パネルの結果であり, 軸方向パネルの結果と大きな相違はみられない。

(3) 残留応力分布形の提案

本論文では, フランジ付き波形鋼板ウェブ断面の部材軸方向におけるウェブの残留応力分布として, 図-19を提案する。図中には本実測から得られた残留応力を併せて示す。この結果から, 波高の違いによる影響が小さいため, 一つの分布形状で表すことが可能である。

図-15(a), (b)の測定結果を参照して, ウェブ内で自己つり合いを保つ分布を考える。図-19に示すように, 溶接によるフランジとの接合線では引張降伏点応力 F_{yw} を仮定し, ウェブ上下縁の接合部付近 ($0.21d_w$ の範囲)で圧縮応力 $0.58F_{yw}$ に変化し, ウェブ内部では一様な引張応力 $0.02F_{yw}$ になる単純なモデルである。ウェブ内部における一様な引張応力は小さいので, これを無視する場合は, 圧縮応力を $0.5F_{yw}$ に変更すれば自己つり合いを保つ応力分布形となる。

なお, 本提案の単純化した残留応力分布形は小断面サイズの供試体から得たものであるが, 1.緒言に記述したように藤村ら⁹⁾および阿田ら⁸⁾の実橋サイズを対象とした研究成果でも類似の応力分布特性が提示されている。

5. 結論

本論文では波形鋼板ウェブ断面の残留応力分布を調べるために, フランジ無しの波形鋼板ウェブ断面部材と, 上下フランジを溶接した波形鋼板ウェブ断面部材を製作し, 応力開放法により残留応力を実測して得られた結果をまとめたものである。プレス成形した波形鋼板ウェブの形状は台形とし, 平鋼板を含み波高比を変化させた12体の供試体を使用した。本研究から得られた主な結論をまとめると, 以下のようである。

- (1) フランジを接合しない波形鋼板ウェブ断面の軸方向残留応力分布は, プレス加工の影響を受けて平鋼板の分布と相異なる。軸方向パネルおよび斜方向パネルともばらつきが生じ, 一定の分布形では表現できない。ウェブ内部における軸方向残留応力は引張応力, 垂直方向残留応力は圧縮応力がそれぞれ卓越している。残留応力レベルは圧縮, 引張ともにウェブの降伏点応力 F_{yw} の10%以内であり, 小さいことがわかった。
- (2) フランジを溶接した波形鋼板ウェブ断面の部材軸方向残留応力分布は, 波形鋼板のアコーディオン効果により平鋼板ウェブを用いた溶接I形断面の残留応力分布と相異なる。残留応力分布は上下フランジとの接合線からウェブ高の20%程度離れた範囲で急激

図-19 フランジ付き波形鋼板ウェブ断面の残留応力分布の提案

に変化し, ウェブ内部では降伏点応力の2%程度の一様な引張応力である。

- (3) 波形鋼板ウェブの軸方向パネルと斜方向パネルの残留応力分布は同様な傾向である。
- (4) 波形鋼板ウェブの軸方向パネルにおけるフランジ端の残留応力レベルは, 波高の増大によりウェブとの溶接線がフランジ幅中央位置から片側にずれることから, 突出幅の狭い側で大きくなり, 広い側では小さくなる。また, フランジ幅中央における引張応力も波高の増大とともに小さくなる。
- (5) 本実測供試体の波高の範囲では, 波形鋼板ウェブの斜方向パネルにおけるフランジの残留応力レベルは, 波高が変化してもウェブの溶接線はフランジ幅の中央で交差するため, フランジ両端の圧縮応力レベルとフランジ幅中央における引張応力レベルは波高によって大きく変化しない。
- (6) プレス加工によって生じるウェブの残留応力は, 波高および波形形状の大きさに関係なく降伏点応力の15%以内である。また, 引張応力が支配的となり, 軸方向パネルと斜方向パネルによる残留応力分布の相異は認められない。

最後に今後の課題として, 波形鋼板ウェブの折り曲げ点付近およびウェブ高さが大きい場合の残留応力分布性状を実測によりさらに検討する必要がある。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート技術協会編：複合橋設計施工規準, 技報堂出版, 2005。
- 2) 渡辺孝一, 久保全弘：波形鋼板ウェブ桁の面内曲げ性能, 土木学会論文集 A, Vol. 62, No. 2, pp. 323-336, 2006。
- 3) 久保全弘, 渡辺孝一：波形鋼板ウェブ桁の横ねじれ座屈性能, 土木学会論文集 A, Vol. 63, No. 1, pp. 179-193, 2007。
- 4) 渡辺孝一, 久保全弘：波形鋼板ウェブ桁のせん断座屈性能, 構造工学論文集, Vol. 53A, pp. 13-24, 2007。

- 5) 土木学会：座屈設計ガイドライン，改訂第 2 版，丸善，2005.
- 6) 藤村伸智，藤井 堅，町 勉，松岡 敬：波型鋼板ウェブの残留応力，土木学会第 56 回年次学術講演会，I-B271, pp. 542-543, 2001.10.
- 7) 小沼恵太郎，後藤浩二，豊貞雅宏：波型鋼板ウェブ構造に生じる溶接残留応力分布の推定，土木学会西部支部研究発表会，I-74, pp.A146-A147, 2003.3.
- 8) 阿田芳久，町 勉，正司明夫，藤井 堅：波型鋼板ウェブのせん断座屈耐荷力に関するパラメトリック解析，プレスとレストコンクリート技術協会，第 11 回シンポジウム論文集，pp. 153-158, 2001.11.
- 9) 池田博之，芦塚憲一郎，山野辺慎一，一宮利通：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，プレスとレストコンクリート技術協会，第 11 回シンポジウム論文集，pp. 451-454, 2001.
- 10) 角谷 務，青木圭一，富本 信，狩野正人：波型鋼板ウェブのせん断耐荷力評価，プレスとレストコンクリート，Vol. 43, No. 1, pp. 96-101, 2001.
- 11) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会：波型鋼板ウェブ橋に関する Q&A, 2002.
- 12) 近藤明雅，日浦隆文，菊池洋一：溶接 I 型断面部材の残留応力の推定に関する研究，土木学会論文報告集，No. 288, pp. 1-11, 1979.

(2016. 6. 8 受付)

RESIDUAL STRESS MEASUREMENT OF CORRUGATED STEEL WEB SECTIONS

Masahiro KUBO and Koichi WATANABE

Corrugated steel plates are used to web plates of a composite prestressed concrete bridge. This paper presents measured residual stress distributions of corrugated steel plates and the results are compared with the case of flat steel plate. Each 6 specimens are fabricated for web plates without flange and with flanges. The corrugated shape was made trapezoidal and the combination of wave height and panel width in the cross-section were changed. From the measured results, the residual stress distributions of the corrugated web section without welding flange is not a uniform distribution due to the influence of press braking, but the residual stress varies within 10% of the yield stress. On the other hand, the residual stress distribution of the web section with welded flanges is rapidly changing in the range of about 20% of web height from the edges, there is a uniform tensile stress of about 2% of the yield stress in the internal web. As the corrugated steel plate had an accordion effect, the residual stress distribution in member axis direction differences in comparison with the case of the flat steel plate.