

## 二相系ステンレス鋼溶接 I 形断面はり部材の終局曲げ強度に関する研究

明石工業高等専門学校 都市システム工学科 三好 崇夫

### 1 研究の背景と目的

今後、架け替え、更新される土木構造物のミニマムメンテナンス化や超長寿命化、LCC 縮減を達成するための方策の一つとして、耐食性に優れ、高い引張強度を有する二相系ステンレス鋼の活用が考えられる。同鋼種の中でも、近年開発されたリーニ二相系ステンレス鋼 SUS821L1 は、Ni 含有量の削減によって材料コストを縮減しながらも、一般的なステンレス鋼 SUS304 と同等の耐食性を有するため、土木構造物への活用が注目されている。本研究では、同鋼溶接 I 形断面部材の小規模橋の主桁等への適用に向けて、SUS821L1 の材料特性、同鋼溶接 I 形断面部材の初期たわみと残留応力、終局圧縮および曲げ強度特性について明確にすることを目的とする。

### 2 研究方法・研究内容

本研究では、板厚 6mm の SUS821L1 熱間圧延鋼板から圧延方向を部材軸方向として、腹板、フランジの幅厚比パラメータ  $\lambda_{pw}$ ,  $\lambda_{pf}$  の組み合わせが異なる 4 体の二軸対称溶接 I 形断面供試体を製作した。各供試体は残留応力計測用と短柱圧縮試験用の 2 種類を準備した。供試体の概略図を図-1 に、その名称と実測寸法を表-1 に示す。腹板とフランジ間はサイズ 6mm のすみ肉溶接とした。また、同鋼の材料特性値を把握するため、供試体の製作に用いた鋼板の圧延、同直角方向から引張、圧縮試験片をそれぞれ 3 体ずつ切り出して材料試験を実施した。残留応力は放電ワイヤ加工機を用いて供試体を切断することによって解放ひずみを計測し、それに弾性係数を乗じて評価した。

短柱圧縮試験の再現解析や、I 形断面ばりの終局曲げ強度解析を実施するため、材料試験結果に基づいて既存の構成式 (MRO 曲線)<sup>1)</sup>、残留応力計測結果に基づいて同分布モデルの適用性も検討した。曲げ载荷試験の実施が困難であったため、短柱圧縮試験の再現解析を実施し、妥当性の検証された解析手法を用いて曲げ強度解析を実施した。同解析では、腹板とフランジの幅厚比パラメータの組み合わせを変えたパラメトリックスタディによって、両者間の相互拘束効果とともに、両幅厚比パラメータの相関を考慮して降伏限界を与える曲線について検討した。

### 3 研究成果

#### 3.1 材料試験結果

圧延方向引張 (LT)、同圧縮 (LC)、圧延直角方向引張 (TT)、同圧縮 (TC) 試験から得られた代表的な応力-ひずみ曲線を図-2 に示す。同図中では圧縮応力、圧縮ひずみは正とし、あわせて MRO 曲線も示した。これより、SUS821L1 鋼板は圧延方向による若干の異方性とラウンドハウス型の応力-ひずみ曲線を呈することがわかる。また、MRO 曲線は圧延方向、引張・圧縮の別を問わず試験結果と良好に一致することがわかる。

LT, LC, TT, TC 試験から得られた弾性係数  $E$ , Poisson 比  $\nu$ , 0.2% 耐力  $\sigma_{0.2}$ , 引張強度  $\sigma_u$ , および破断伸び  $\epsilon_f$  の平均値について、

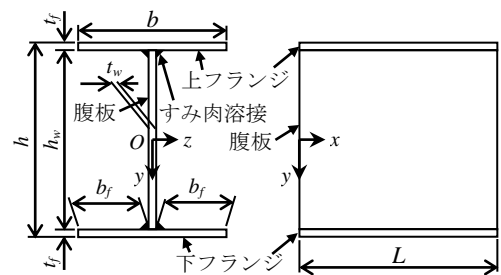


図-1 溶接 I 形断面供試体の概略図

表-1 供試体の名称と寸法

供試体名	W3-F4	W3-F7	W6-F7	W6-F10
$t_w$ (mm)	6.05	6.13	6.15	6.12
$t_f$ (mm)	6.09	6.38	6.14	6.38
$b$ (mm)	71.9	121.9	121.8	171.9
$h$ (mm)	89.3	89.0	164.2	165.2
$h_w$ (mm)	77.1	76.2	151.9	152.5
$b_f$ (mm)	32.9	57.9	57.8	82.9
$\lambda_{pw}$	0.45	0.75	0.78	1.08
$\lambda_{pf}$	0.34	0.34	0.67	0.67
$L$ (mm)	269.1	368.0	497.3	518.1

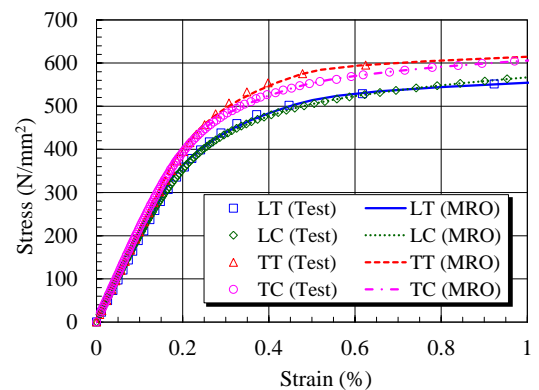


図-2 応力-ひずみ曲線

表-2 材料特性値

試験種別	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\nu$	$\sigma_{0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_f$ (%)
LT	192003	0.23	511	710	43
LC	194793		494		
TT	212708	0.24	577	750	32
TC	215556		537		
ミルシート*1			573	746	38
規格値			400	600	30

注記 \*1: 圧延直角方向引張試験

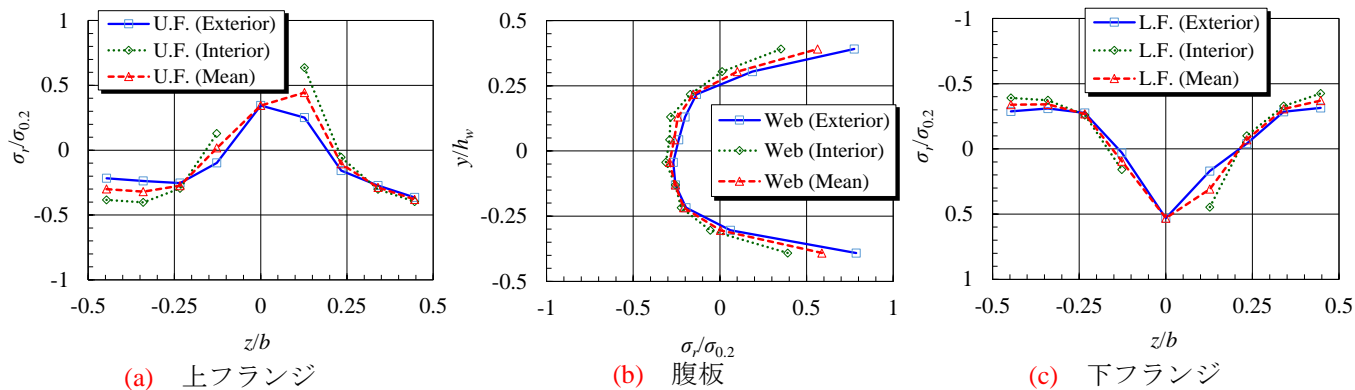


図-3 W6-F7 試験体の残留応力分布

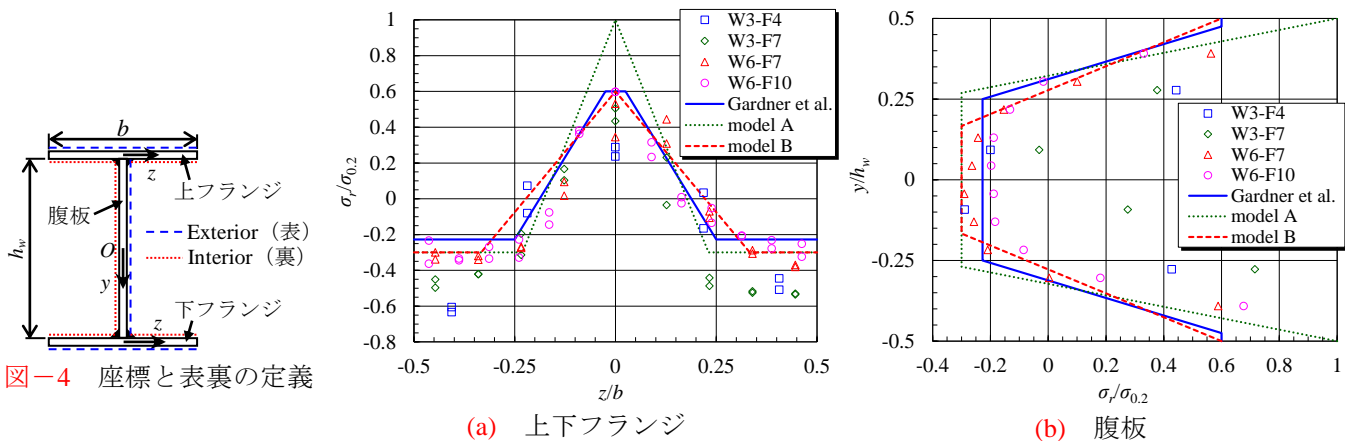


図-5 残留応力分布モデルとの比較

それらのミルシート値、規格値と比較して表-2に示す。同表より、TT試験から得られた $\sigma_{0.2}$ 、 $\sigma_u$ および $\epsilon_f$ はミルシート値と対応しており、いずれの材料特性値も規格値を満足していることがわかる。 $E$ 、 $\sigma_{0.2}$ 、 $\sigma_u$ には若干の異方性が認められ、SUS821L1の $\sigma_{0.2}$ 、 $\sigma_u$ はそれぞれ構造用炭素鋼SM570の降伏点(460N/mm<sup>2</sup>以上)、引張強度(570N/mm<sup>2</sup>以上)に概ね対応することがわかる。

### 3.2 残留応力計測結果

計測結果の一例としてW6-F7供試体の残留応力分布を図-3に示す。同図中の座標 $y$ 、 $z$ と表(Exterior)、裏(Interior)の定義は図-4に示す。同図のMeanは表裏の平均であり、図-3より、残留応力の絶対最大値は0.2%耐力よりも小さく、圧縮残留応力の大きさは概ね0.2%耐力の3割程度であること、残留応力の板曲げ成分は然程大きくないことがわかる。

上下フランジと腹板について、各試験体の残留応力計測結果(平均値)とGardnerらによって提案されている二相系ステンレス鋼溶接I形断面材の残留応力分布モデル<sup>2)</sup>、引張残留応力の最大値を0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ 、圧縮残留応力の最大値を $\sigma_{0.2}$ の0.3倍とし、最大引張から最大圧縮まで残留応力を線形変化させ、圧縮残留応力を一定値としたモデルA、同モデルと分布形状は同じで、引張残留応力の最大値を $0.6\sigma_{0.2}$ としたモデルBを比較して図-5に示す。これより、腹板の幅厚比パラメータがフランジのそれに比して小さいW3-F4試験体では上下フランジの圧縮残留応力が大きく、腹板の引張残留応力分布領域が拡大した。腹板の幅厚比パラメータが大きいW6-F7、W6-F10試験体では残留応力分布モデルに適合する傾向にあるが、同モデルのSUS821L1溶接I形断面材への適用性に関しては、試験体数を増やすとともに大型断面に対する計測結果に基づいて検討が必要である。

### 3.3 初期たわみ計測結果

短柱圧縮試験体の上下フランジと腹板の初期たわみの絶対最大値について、道路橋示方書<sup>3)</sup>におけるその許容値(腹板は板の平面度、フランジは直角度)とともに表-3に示す。これより、腹板の初期たわみの絶対最大値は、W3-F7供試体を除いて許容値を満たしているものの、フランジについては全試験体とも許容値を満たしていない。

この原因として、試験体の公称板厚が 6mm と薄いことに加えて、ステンレス鋼は炭素鋼に比して熱膨張率が大きく熱伝導率が小さいため、大きな溶接変形を生じたことが考えられる。

### 3. 4 短柱圧縮試験結果

短柱圧縮試験結果として、各供試体の荷重-軸方向変位関係を図-6 に示す。同図において、縦軸は圧縮力を供試体の断面積で除して平均応力  $\sigma$  とし、0.2%耐力  $\sigma_{0.2}$  で無次元化した。横軸は軸方向変位  $u$  を部材長  $L$  で無次元化した。同図中には荷重-変位関係の線形解、溶接二相系ステンレス構造物の設計基準 (EC3) <sup>4)</sup> による設計強度とともに、終局強度点を▽印で示した。

図-6 より、終局強度は、W3-F4, W3-F7, W6-F7, W6-F10 の順に、腹板、フランジの幅厚比パラメータが大きい供試体ほど低下した。W6-F10 供試体を除いて終局強度は 0.2%耐力を上回り、各供試体の終局強度は EC3 による設計強度も上回った。図-2 に示すように、SUS821L1 は降伏棚のないラウンドハウス型の応力-ひずみ曲線を有するため、フランジに大きな初期たわみを持ちながらも高い強度を示すと考えられる。試験終了後の各供試体の残留変形状況を写真-1 に示す。

### 3. 4 再現解析

SUS821L1 溶接 I 形断面ばりの曲げ強度解析には、著者らによって開発された、8 節点シェル要素を有する弾塑性有限変位解析プログラムを用いた。同プログラムの検証のため、図-7 に示す短柱圧縮試験の解析モデルを構築して再現解析を実施した。同モデルの初期たわみ形状については、腹板は二重正弦半波、フランジは板幅方向に直線、長さ方向に正弦半波形とし、その最大値は腹板、上下フランジそれぞれの実測最大値を仮定した。残留応力分布は図-5 に示すモデル A を用いた。

解析結果として、W6-F7 試験体の荷重-軸方向変位関係を実験結果と比較して図-8 に示す。これより、両者は良好に一致するため、同プログラムを用いて SUS821L1 溶接 I 形断面ばりの曲げ強度解析を実施した。

### 3. 5 曲げ強度解析

解析ケースとして、腹板の幅厚比パラメータ  $\lambda_{pw}$  を 0.3 から 1.8 まで 0.5 刻みで、フランジの同パラメータ  $\lambda_{pf}$  を 0.3 から 1.2 まで 0.3 刻みで変動させ、それらの組み合わせを変えた 16 ケースを設定した。これらは EC3<sup>4)</sup> における純曲げを受ける二相系ステンレス鋼溶接 I 形断面ばり部材のクラス 1~3 の断面区分に対する腹板、フランジの

表-3 初期たわみの絶対最大値

試験体名		W3-F4	W3-F7	W6-F7	W6-F10
上フランジ (mm)	計測値	0.89	1.50	2.08	1.72
	許容値	0.36	0.61	0.61	0.86
腹板 (mm)	計測値	0.13	0.34	0.43	0.30
	許容値	0.31	0.31	0.61	0.61
下フランジ (mm)	計測値	0.59	1.50	1.05	0.94
	許容値	0.36	0.61	0.61	0.86

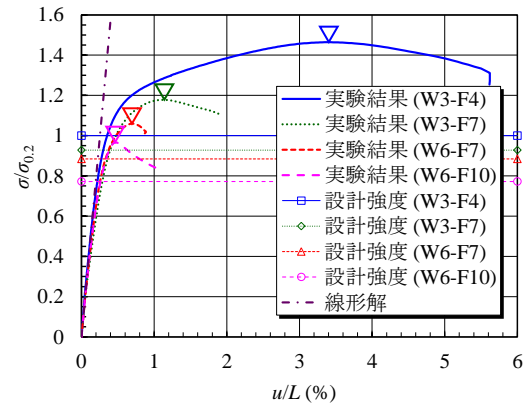


図-6 荷重-軸方向変位関係



写真-1 試験終了後の変形状況

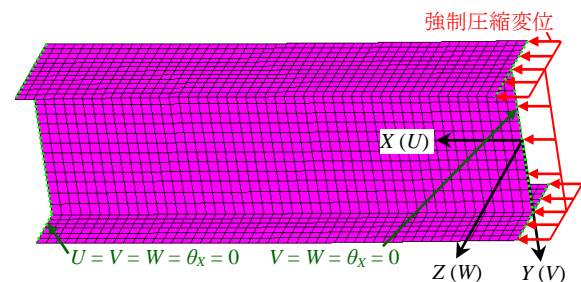


図-7 再現解析モデル (W6-F7供試体)

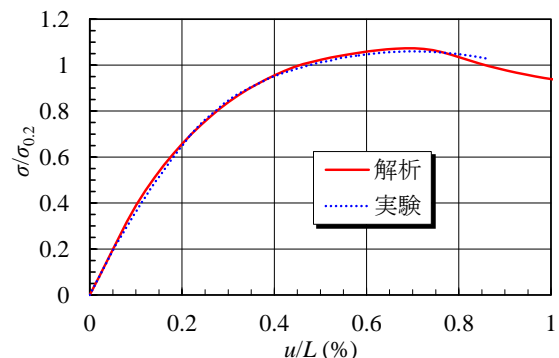


図-8 実験結果と解析結果の比較



限界幅厚比パラメータ, 道路橋示方書<sup>3)</sup>における SM570 鋼の腹板, フランジの降伏限界幅厚比パラメータを網羅するように設定した. 各ケースとも, EC3<sup>4)</sup>によれば横ねじり座屈に対する強度の低減は受けない. 解析ケース名は  $\lambda_{pw} = 1.3$ ,  $\lambda_{pf} = 0.3$  であれば 13W3F のように表す. 腹板とフランジの断面積比  $\rho$  は 2, 腹板の縦横比  $a$  は 1 とした.

解析モデルは, 図-9 に示すように, 垂直補剛材で挟まれた 1 パネルを取り出し, 両端断面に曲げ変形を強制変位によって与えた. 初期不整としては, 上下フランジと腹板に図-5 に示すモデル B の残留応力分布, 腹板と圧縮フランジに初期たわみを与えた. 初期たわみ形状は, 弾性座屈応力が最小となるように, 圧縮フランジは逆対称のねじりモード, 腹板は軸方向に正弦 1 波, 板幅方向に正弦半波形とし, 各々の最大値は道路橋示方書<sup>3)</sup>に規定されている製作精度の上限値とした. 構成式は SUS821L1 圧縮板の終局強度を安全側に評価できる<sup>5)</sup>ことから, TT 試験から得られた応力-ひずみ曲線を用いた.

解析結果として, 解析ケース 3W3F, 3W12F, 18W3F と 18W12F について, 曲げモーメント  $M$  と両端断面の回転角  $\phi$  (図-9 参照) の関係を図-10 に示す. 同図において,  $M_{0.2}$  は降伏応力を 0.2% 耐力で置き換えた降伏モーメント,  $\phi_{0.2}$  はその時の回転角を表す. また, 同図中には  $\nabla$  印で終局強度点を示した. 以降では, この点の  $M$  を終局モーメント  $M_U$  と称する. 図-10 より, いずれも荷重-変位曲線は線形解を接線として立ち上がり, 緩やかにモーメントが増加して終局状態に至ることがわかる.

解析から得られた各ケースの  $M_U/M_{0.2}$  について, EC3<sup>4)</sup>の純曲げを受ける二相系ステンレス鋼溶接 I 形断面部材の設計曲げ強度と比較して表-4 に示す. これより, 解析ケース 8W12F, 13W9F, 13W12F, 18W9F, 18W12F を除いて  $M_U$  は  $M_{0.2}$  よりも大きく, SUS821L1 溶接 I 形断面よりは高い曲げ強度を有することがわかる. また, 曲げ強度は EC3 の設計強度と比べて 1.2~1.5 倍程度と大きく, 限界幅厚比パラメータの見直しなど設計法の合理化の余地が残されているといえる.

解析ケース 3W9F, 8W9F, 13W9F と 18W6F について, 曲げモーメント  $M$  とはりの軸方向に原点から  $X = a/4$  点の圧縮フランジの  $-Z$ ,  $+Z$  軸側の突出端における面外変位  $\delta$  ( $+Y$  軸方向を正とする) の関係を図-11 に示す. ただし,  $M$  は  $M_{0.2}$  で,  $\delta$  はフランジの板厚  $t$  で無次元化し, 終局強度点を  $\nabla$  印で示している. これより, 腹板の幅厚比パラメータが小さいほど終局時の面外変位が抑制されており, 腹板, フランジの相互作用が認められる.

各解析ケースのフランジ, 腹板の幅厚比パラメータ  $\lambda_{pf}$ ,  $\lambda_{pw}$  と終局曲げ強度  $M_U/M_{0.2}$  (括弧中の数値) の関係について, 道路橋示方書<sup>3)</sup>における SM570 溶接 I 形断面桁の腹板, フランジの降伏限界幅厚比パラメータ, EC3<sup>4)</sup>における純曲げを受ける二相系ステンレス鋼溶接 I 形断面ばり部材のクラス 1~3 の断面区分に

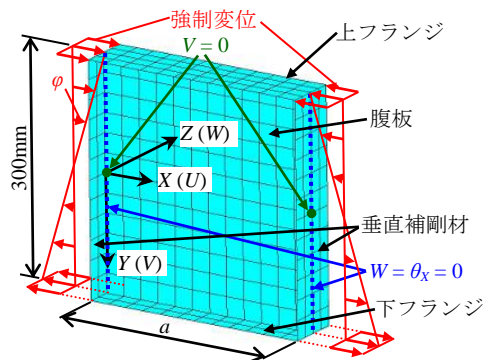


図-9 曲げ強度解析モデル

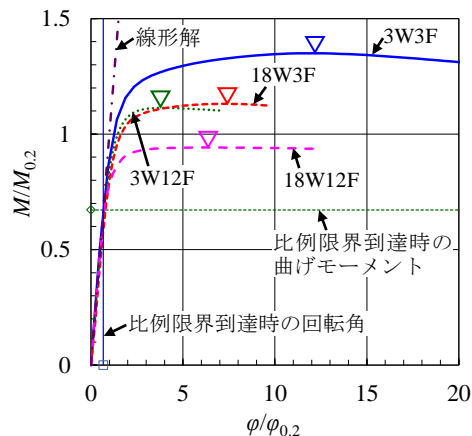


図-10 モーメントと回転角の関係

表-4 終局曲げ強度  $M_U/M_{0.2}$  の比較

解析ケース	解析 (A)	EC3 (E)	A/E	解析ケース	解析 (A)	EC3 (E)	A/E
3W3F	1.350	1.125	1.20	13W3F	1.145	0.869	1.32
3W6F	1.238	0.997	1.24	13W6F	1.054	0.865	1.22
3W9F	1.164	0.883	1.32	13W9F	0.980	0.747	1.31
3W12F	1.113	0.791	1.41	13W12F	0.952	0.747	1.28
8W3F	1.196	0.936	1.28	18W3F	1.131	0.834	1.36
8W6F	1.112	0.933	1.19	18W6F	1.027	0.830	1.24
8W9F	1.031	0.817	1.26	18W9F	0.969	0.710	1.37
8W12F	0.991	0.723	1.37	18W12F	0.942	0.612	1.54

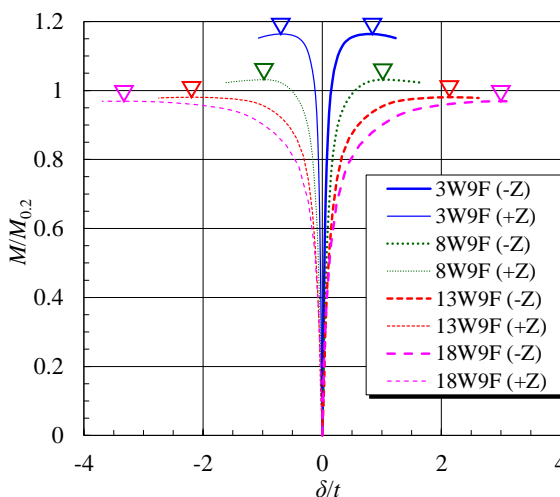


図-11 曲げモーメントと面外変位の関係

対する腹板, フランジの限界幅厚比パラメータとともに図-12に示す.

図-12より, EC3のクラス3断面に対する限界幅厚比パラメータよりも大きな腹板, フランジの幅厚比パラメータをもつ複数の解析ケースにおいて,  $M_U/M_{0.2}$ は1よりも大きいことから, EC3<sup>4)</sup>のクラス3断面に対する限界幅厚比パラメータは, SUS821L1溶接I形断面ばかりに対して極めて安全側であることがわかる. そこで,  $M_U/M_{0.2}=1$ の等高線に基づいて, 腹板, フランジの幅厚比パラメータの相関を考慮した降伏限界を表す曲線として次式を提案する. 同曲線を図-12に示す.

$$-0.2553\lambda_{pw}^2 + 0.0779\lambda_{pw} + 0.4558\lambda_{pf} = 1 \quad (\lambda_{pw} \leq 1.8, \lambda_{pf} \leq 1.2) \quad (1)$$

以上の終局曲げ強度解析では, I形断面桁の垂直補剛材間のパネルを取り出した解析モデルによる検討を行ったが, その妥当性, 横ねじり座屈や横倒れ座屈との連成の影響については, 載荷実験を実施して検討する必要があると考える. また, 本検討では, 腹板とフランジの断面積比, 腹板の縦横比を変動させた場合の影響については明確にできておらず, これらについても今後の課題である.

#### 4 研究がもたらす効果

二相系ステンレス鋼の中でも材料コスト縮減が図られたリーニ二相系ステンレス鋼 SUS821L1は, 2015年9月にJIS G 4304に追加されたばかりであり, 土木構造物への活用によって薄肉軽量構造化, ミニマムメンテナンス化や超長寿命化に伴うLCC縮減が期待されている. 本研究では, 同鋼溶接I形断面部材の残留応力分布特性や終局圧縮ならびに曲げ強度特性について明らかにしたものであり, 本研究成果は同鋼溶接部材を土木構造物へ活用するための設計基準の整備に資するものであると考える.

#### 5 研究の波及効果

リーニ二相系ステンレス鋼は, ダム, 堰や水門等の水際構造物や設備の長寿命化, 高引張強度を生かした薄肉軽量化に伴うコスト縮減等に寄与する技術として, 国土交通省の新技术情報システムにも登録されている. 本研究成果は, 橋梁の主部材に同鋼溶接部材を適用する場合のみならず, 水際構造物の設計や技術開発に資することも期待される.

【参考文献】 1) 森ら: ステンレス鋼の応力-ひずみモデルが終局強度に及ぼす影響について, 鋼構造年次論文報告集, Vol.15, pp.645-652, 2007., 2) L. Gardner et al.: Residual stress distributions in welded stainless steel sections, This-Walled Structures, No.79, pp.38-51, 2014., 3) 社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2012., 4) European Committee for Standardization, CEN: Eurocode3-Design of steel structures-part1-4: General rules-Supplementary rules for stainless steels, EN 1993-1-4, 2006., 5) 三好崇夫: リーニ二相系ステンレス鋼板の終局圧縮強度に及ぼす応力-ひずみ曲線の影響, 明石工業高等専門学校研究紀要, 第59号, pp.7-12, 2017.

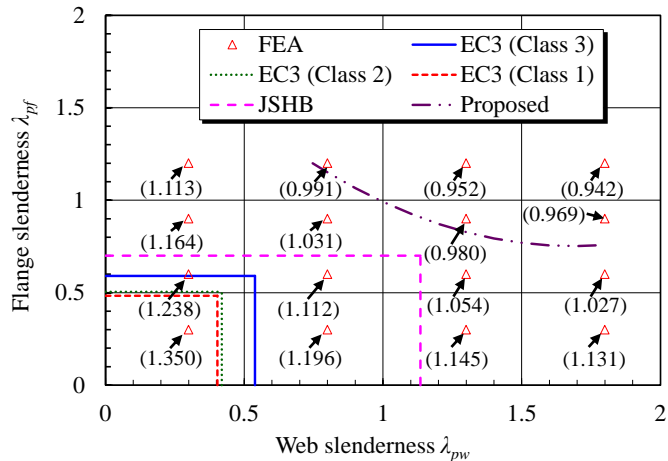


図-12 幅厚比パラメータと終局曲げ強度の関係