

SUS323L および SM570 製溶接組立部材断面の残留応力分布

The Residual Stress Distribution of the Section of Welding Member made of SUS323L and SM570

○宮崎 靖大*
Yasuhiro MIYAZAKI

ABSTRACT The lean duplex stainless steel is an economically material because of the low Ni content. The purpose of this research was to clarify the residual stress of the welded joint plates by experiment, which is necessary the material placement at structures of the stainless steel and the carbon mild steel suitable. Firstly, the specimens in this study have I-shaped and square hollow cross section, and these materials are SUS323L only and SUS323L and SM570 combination for JIS. Secondary, measurement of residual stress is by a stress relaxation method. Finally, a residual stress distribution model based on experimental results was proposed in this research.

Keywords: リーン二相系ステンレス鋼, 高強度鋼, 溶接残留応力, 異材溶接接合

Lean type of duplex stainless steel, high strength steel, welding residual stress, different material welding

1. 序論

ステンレス鋼は、従来から土木鋼構造物に使用されている炭素鋼に比べて優れた耐久性を有する。このため、ステンレス鋼は、現状の早急な課題解決が望まれる経年劣化した構造物への補修や超長期間維持管理性能が優れる鋼構造物の実現に向けて魅力的な材料の一つであるといえる。このようなステンレス鋼の中でも二相系ステンレス鋼は、一般的なステンレス鋼であるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 などに比べて高強度かつ高耐食性を示す。一方、二相系ステンレス鋼は、Ni などの希少元素を多く含有するため、材料価格の変動が大きく高価となる。そこで、Ni の含有量を抑制した二相系ステンレス鋼の開発が進められ、我が国でも 2015 年にリーニ二相系ステンレス鋼 2 種類が JIS¹⁾に追加された。

著者ら^{2)~4)}は、これまでにステンレス鋼を土木鋼構造物主部材に活用することを目的として、材料特性およびステンレス鋼板構造物の力学的性質

を実験と数値計算により明らかにしてきた。しかしながら、前述したリーニ二相系ステンレス鋼については、比較的新しい材料であるため、材料特性や溶接鋼構造物の基本要素である板部材等の強度特性を詳細に調べた研究例⁵⁾は、少ないのが現状である。また、経済的な観点については、リーニ二相系ステンレス鋼で構成される構造物においても、従来の炭素鋼製構造物の建設費用に比べて高価となることが否めない。そこで、ステンレス鋼を鋼構造物に用いる際には、腐食環境が厳しい部材のみをステンレス鋼、その他の比較的腐食環境が緩やかな箇所には従来の炭素鋼とした構成が経済性の観点から有効であるといえる。このような構造系を採用するためには、ステンレス鋼と炭素鋼の接合部における力学的特性および腐食特性⁶⁾を明確にする必要がある。

本研究では、リーニ二相系ステンレス鋼と炭素鋼を溶接組立てしたハイブリッド断面の残留応力分布について、実験により明らかにすることを目

*博士(工学) 長岡工業高等専門学校准教授 (〒940-8532 新潟県長岡市西片貝町 888)

的とする。また、ハイブリッド断面の残留応力測定結果は、測定データが少ないリーニ二相系ステンレス鋼のみで構成される供試体の残留応力分布も同様に実験を行い、これらの結果と比較しながら明らかにする。まず、供試体形状は、I形および中空正方形断面を有する2パターンの形状とする。そして、これら供試体を構成する材料は、リーニ二相系ステンレス鋼 SUS323L および炭素鋼 SM570 とする。つぎに、供試体の残留応力は、弛緩法における分割法⁷⁾を採用し、対象断面の機械式切断前後のひずみの差より測定する。最後に本研究では、以上の実験結果を精査し、SUS323L と SM570 で構成されるハイブリッド断面および SUS323L のみで構成される溶接部材の残留応力分布を明らかにする。

2. 残留応力測定供試体および測定方法

2. 1 供試体形状

本研究で対象とする材料は、公称板厚 6mm のリーニ二相系ステンレス鋼 SUS323L および構造用炭素鋼 SM570 とする。表 1 は、これら2種類の材料の機械的性質および化学成分を示す。ここで、同表中の 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ については、SM570 の場合、降伏応力 σ_y を意味している。また、対象供試体は、これらの鋼板を溶接組立てした I 形および中空正方形断面とし、式(1)に示す供試体断面を構成する各板の幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ 、 $\bar{\lambda}_{pft}$ および $\bar{\lambda}_{pw}$ を 0.7 および 1.0 として決定する。

$$\bar{\lambda}_p = \bar{\lambda}_{pft} = \bar{\lambda}_{pw} = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (1)$$

ここで、 b は板幅を、 t は板厚を、 E はヤング係数 (SUS323L では 200GPa, SM570 では 206GPa) を、 ν はポアソン比 (=0.3) を、 k は座屈係数 ($\bar{\lambda}_{pft}$ では 0.425, その他は 4.0) を、それぞれ意味する。なお、 $\bar{\lambda}_p$ 、 $\bar{\lambda}_{pft}$ および $\bar{\lambda}_{pw}$ の決定にあたっては、I 形断面供試体の上下フランジを自由突出板、その

表 1 対象材料の機械的性質および化学成分

鋼種	板厚 (mm)	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ or σ_y (MPa)	引張強さ σ_u (MPa)	伸び (%)	化学成分(mass%)									
					C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
SUS323L	6	593	743	34	0.014	0.51	1.55	0.028	0.000	4.00	23.5	0.33	0.18	0.15
SM570	6	579	630	26	0.150	0.27	1.55	0.009	0.002	0.02	0.02	0.00	0.01	-

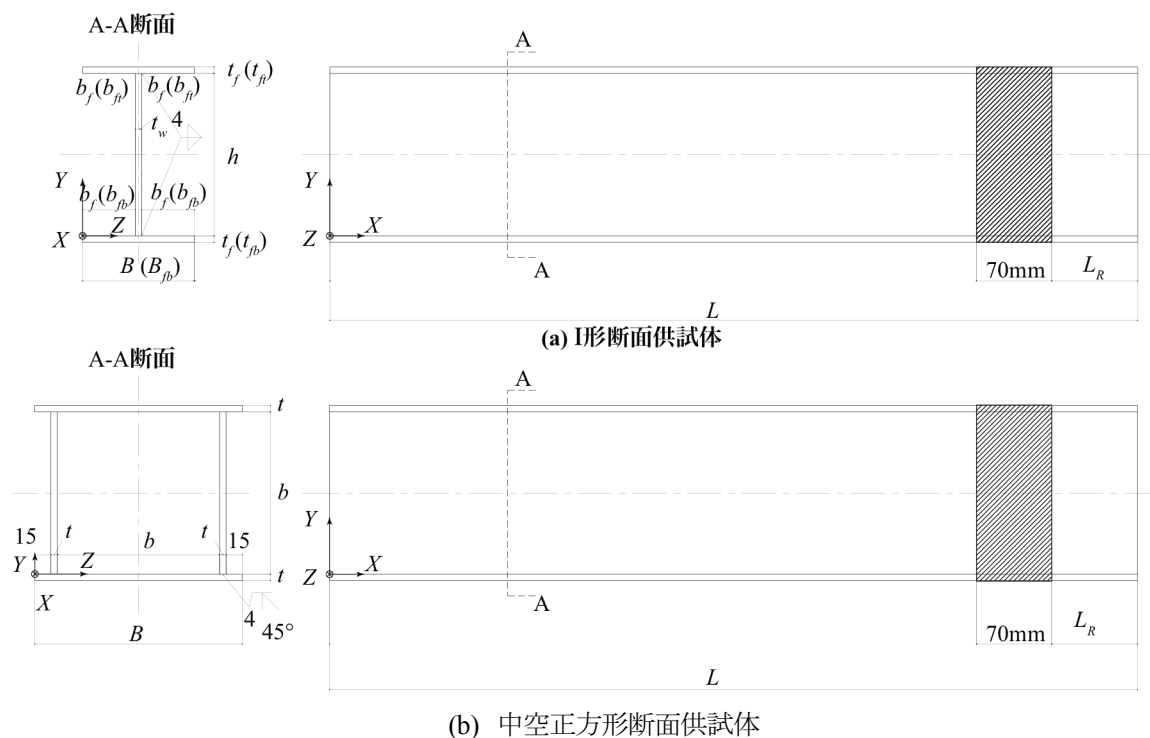


図 1 残留応力測定供試体形状

他の供試体断面を構成する板を周辺単純支持板として、これらの板が単一面内圧縮負荷を受ける条件を用いる。そして、腹板および下フランジを SUS323L, 上フランジを SM570 としたハイブリッド断面については、 $\bar{\lambda}_{pft}$ および $\bar{\lambda}_{pw}$ を 0.7 とした供試体のみを用いる。図 1 は、以上のように決定した供試体形状の外観を示す。ここで、同図中の括弧内の記号は、ハイブリッド断面供試体の寸法を表示する際に用いる。また、表 2 は、対象とした全供試体の実測寸法をまとめている。同表中の記号は、図 1 中の記号と対応している。

表 3 は、以上の供試体を製作する際に用いた溶接材料および溶接条件をまとめている。ここで、ハイブリッド断面供試体における SUS323L と SM570 の溶接部には異材溶接用材料 TS309-FB0 相当の溶接用ワイヤを、その他の溶接部では

YS2209 相当の溶接用ワイヤを用いている。また、全供試体の溶接方法は、MIG 溶接を用いている。

表 2 供試体寸法諸元

断面形状 モデル名	I 形			中空正方形	
	IHY07	I07	I10	SH07	SH10
$\bar{\lambda}_{pf}(\bar{\lambda}_{pft})$	0.65	0.71	1.01	—	—
$\bar{\lambda}_w(\bar{\lambda}_p)$	0.71	0.71	1.01	0.71	1.01
$\bar{\lambda}_{pfb}$	0.71	—	—	—	—
$t_f(t_{ft})$ [mm]	6.5	6.2	6.2	—	—
t_{fb} [mm]	6.1	—	—	—	—
$b_f(b_{ft})$ [mm]	49.3	49.8	70.5	—	—
b_{fb} [mm]	49.7	—	—	—	—
$t_w(t)$ [mm]	6.2	6.1	6.2	6.2	6.2
$h(b)$ [mm]	152.8	152.5	216.8	152.6	216.7
$B(B_{ft})$ [mm]	104.7	105.4	147.4	194.4	258.2
B_{fb} [mm]	105.2	—	—	—	—
L [mm]	752.2	751.4	944.9	751.6	944.3
L_R [mm]	230.2	229.4	229.9	229.6	229.3

表 3 供試体製作条件 (溶接条件)

製作供試体	溶接材料	ワイヤ径 mm	電流 A	電圧 V	速度 mm/min	シールドガス流量 l/min
IHY07 (上フランジと腹板の溶接)	TS309-FB0	1.2	200	20	630	20
IHY07 (腹板と下フランジの溶接), I07, I10, SH07, SH10	YS2209	1.2	200	20	630	20

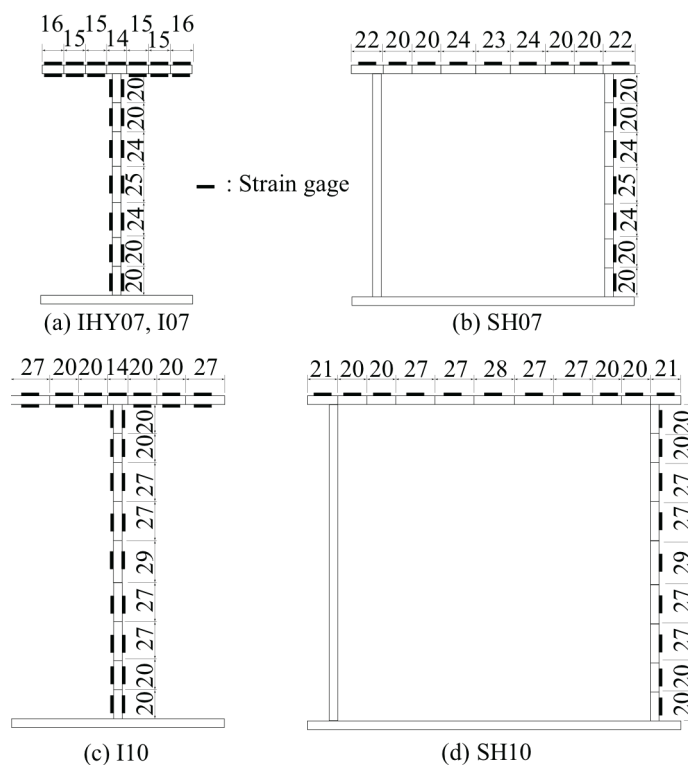
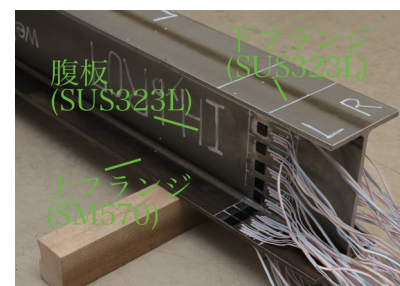
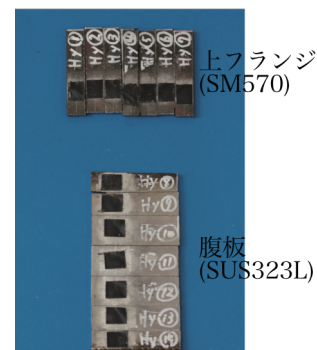


図 2 供試体の残留応力計測位置



(a) 残留応力測定前



(b) 残留応力測定後

図 3 残留応力測定前後の供試体 (IHY07)

2. 2 残留応力測定方法

図2は、各供試体断面における残留応力測定位置を示す。同図に示すように、残留応力の測定は、弛緩法における分割法を採用することとし、図1で示した柱長さ方向70mmの部分より、図2に示す供試体断面を幅14から29mm程度の位置にてジグソーおよびバンドソーを用いた機械式切断により行う。そして、残留応力は、図2の切断位置に貼り付けた3軸弾性ひずみゲージ（東京測器研究所製FRA-5-11-3L）より、切断前後のひずみの差に材料のヤング係数 E を乗じて算出する。図3には、IHY07 供試体の残留応力測定前後の状況

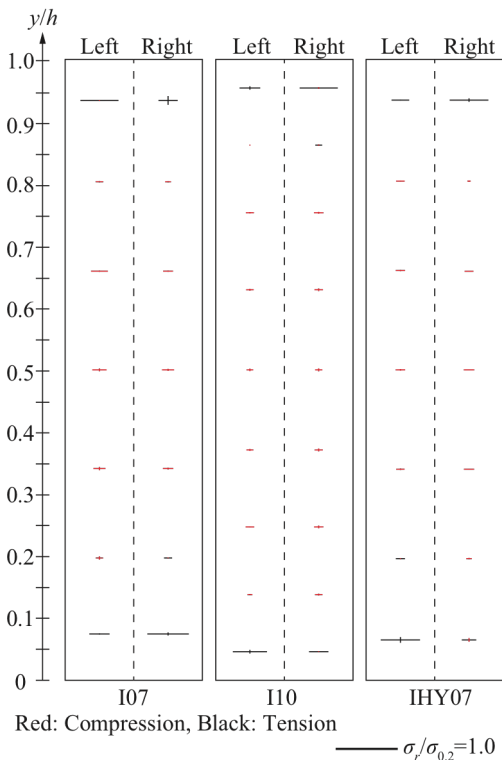
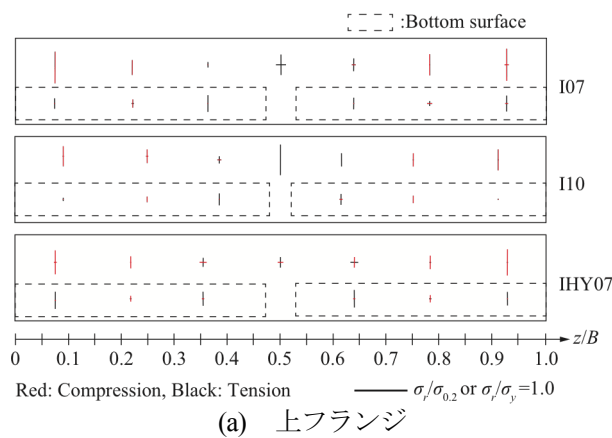


図4 主応力表示した残留応力 (I 形断面供試体)

を示している。

3. SUS323L および SM570 を溶接組立した板の残留応力

3. 1 主応力表示した残留応力

図4および図5は、I 形断面および中空正方形断面供試体の3軸弾性ひずみゲージより得られた主応力の大きさとその方向の残留測定結果を示す。また、主応力の算出にあたっては、式(2)を用いる。

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu} (\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_3), \quad \sigma_3 = \frac{E}{1-\nu} (\varepsilon_3 + \nu \varepsilon_1) \quad (2a, 2b)$$

ここで、 σ_1 および σ_3 は最大および最小主応力を、 ε_1 および ε_3 は式(3)で表す最大および最小主ひずみを意味する。

$$\varepsilon_1, \varepsilon_3 = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_{\theta 1} + \varepsilon_{\theta 3} \pm \sqrt{2 \{ (\varepsilon_{\theta 1} - \varepsilon_{\theta 2})^2 + (\varepsilon_{\theta 3} - \varepsilon_{\theta 2})^2 \}} \right] \quad (3)$$

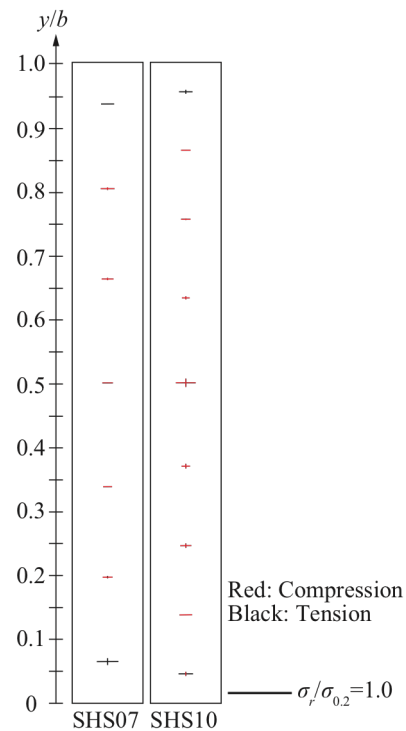
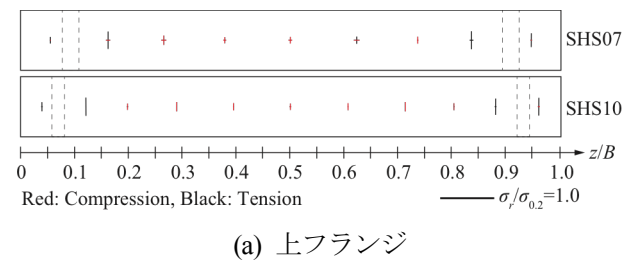


図5 主応力表示した残留応力 (中空正方形断面供試体)

ここで、 $\varepsilon_{\theta 1}$ (図1におけるX軸方向)、 $\varepsilon_{\theta 2}$ (X軸と角度45°の方向) および $\varepsilon_{\theta 3}$ (X軸と角度90°の方向) は、残留応力測定の際に供試体に貼付けた3軸弾性ひずみゲージから得られるひずみの値である。さらに、主応力の方向 α は、式(4)で算出している。

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\varepsilon_{\theta 2} - \varepsilon_{\theta 1} - \varepsilon_{\theta 3}}{\varepsilon_{\theta 1} - \varepsilon_{\theta 3}} \quad (4)$$

ただし、式(4)については、 $\varepsilon_{\theta 1}$ および $\varepsilon_{\theta 3}$ の大小関係により、 $\varepsilon_{\theta 1}$ の軸を基準とした右回りまたは左回りの角度として選定している。なお、図4および図5の残留応力の値は、0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ または降伏応力の値 σ_y で無次元化している。そして、残留応力を表示する位置は、図1で示した座標軸を基準に、上フランジ部および腹板部で、それぞれの全板幅で無次元化して表示している。両図より、全ての結果において、溶接部近傍では引張残留応力が、溶接から遠ざかる領域では圧縮残留応力が生じていることが確認できる。つぎに、図4のハイブリッド断面 IHY07 および SUS323L のみの断面 I07 の残留応力に着目してみると、その傾向には大差ないことが確認できる。また、IHY07 および I07 の上フランジの両端部における板の表裏面の残留応力に着目してみると、両供試体共に表側で圧縮、裏側で引張の残留応力が生じていることがわかる。この原因については、供試体への製作加工の前後に導入されたものかどうかは判別できなかったものの、この領域における断面切断前後いずれの時点でも目視での変形等は確認できなかった。さらに、図4および図5のI形断面および中空正方形断面ともに、上フランジと腹板の最大主応力または最小主応力の方向はほぼX軸方向に一致することがわかる。この結果より、以降では、主としてX軸方向のひずみゲージより得られた残留応力に着目する。

3. 2 X 軸方向の残留応力分布およびそのモデル化

図6、図7および図8は、I形断面および中空正方形断面供試体より得られたX軸方向の残留応力を示す。これらの図の(a)に示す上フランジでは縦軸が、これらの図の(b)に示す腹板では横軸が、各計測位置で測定した残留応力 σ_r を0.2%耐力または降伏応力で無次元化した残留応力の値を表している。また、これに直交する軸について、これらの図の(a)に示す上フランジでは残留応力計測

位置を上フランジの全板幅で、これらの図の(b)に示す腹板では残留応力計測位置を腹板の板幅で、それぞれ除した値を表している。まず、図6、図7および図8の点で示す残留応力測定結果についてみると、全供試体で測定した残留応力は、溶接部近傍にて、0.2%耐力または降伏応力の最大0.7倍程度の引張残留応力が発生することがわかる。ここで、ステンレス鋼の応力ひずみ関係はラウンドハウス型を示すため、計測したひずみの値にヤング係数を乗じて残留応力を算出する方法が、理論的でないことが考えられる。しかし、本研究で対象としたSUS323Lは、0.2%耐力の70%程度の応力の大きさであれば、ほぼ比例限界点以下の応力である²⁾ため、本論文で採用した炭素鋼と同様

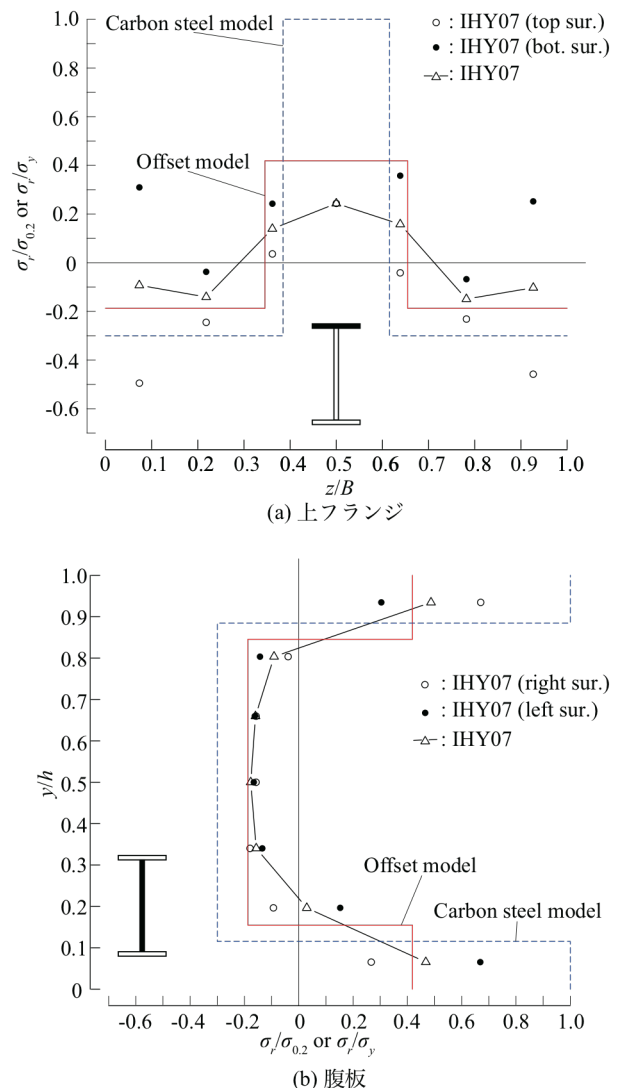


図6 ハイブリッド断面供試体のX軸方向残留応力 (IHY07)

の残留応力の算出方法は、問題ないと判断する。
つぎに、図6と図7を比較してみると、SUS323L
と SM570 のハイブリッド断面の残留応力の測定
結果は、SUS323L のみの結果とほぼ同等の結果
となることがわかる。

図7と図8のSUS323Lのみの供試体の点と実
線または点と破線で示す平均の残留応力の大き
さに着目してみると、I形断面および中空正方形
断面の圧縮残留応力の大きさは、0.2%耐力の20
%程度となり、断面形状の違いによる変化はほと
んど確認できないことがわかる。また、両形状の引
張および圧縮残留応力の分布傾向は、同様である
ことが両図より確認できる。一方、引張残留応力
に着目してみると、図7に示すI形断面の測定結
果は、図8の中空正方形断面の結果に比べて最大

約1.67倍となることがわかる。この引張残留応力
の大きさの違いについては、I形断面供試体では
フランジと腹板の組立を両側隅肉溶接、中空正方
形断面供試体ではフランジと腹板の組立を片側の
みの隅肉溶接とした供試体製作時の断面各板への
溶接時の入熱量の違いによる結果によるものと考
える。

本研究では、以上の残留応力測定結果を基に、
SUS323LとSM570で構成されるハイブリッド
断面およびSUS323Lのみの断面が同等の残留応
力を示すこととして、その残留応力分布モデルを
提案する。これらの提案する残留応力分布モデル
は、先に示した図6、図7および図8中の実線の
みで表している。この残留応力分布モデルを決
めるにあたっては、供試体断面を構成する各板で自

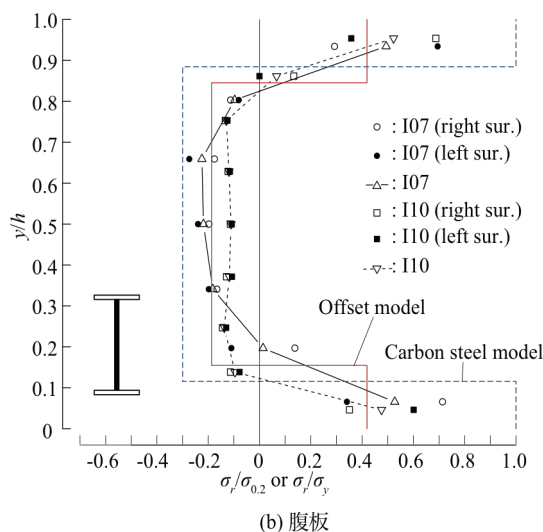
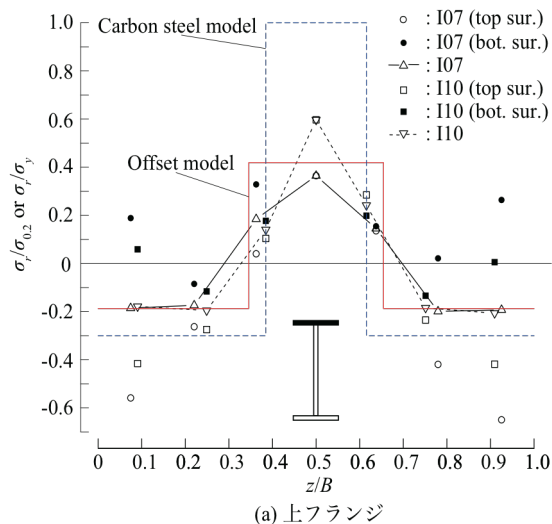


図7 SUS323L製I形断面供試体のX軸方向残留応力(I07, I10)

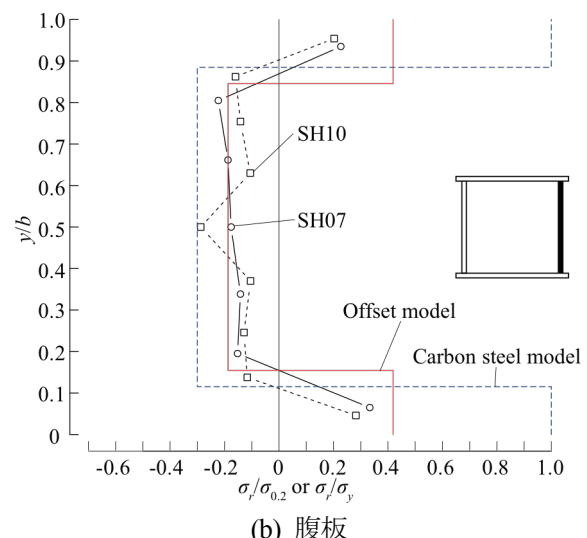
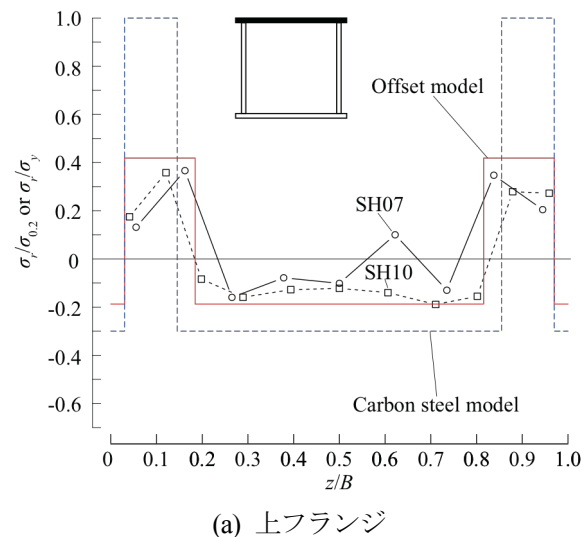


図8 SUS323L製中空正方形断面供試体のX軸方向残留応力(SH07, SH10)

己平衡を保つ矩形分布としている。また、その大きさは、各供試体の各断面で測定した SUS323L 部分の最大引張および最大圧縮残留応力の値を平均して算出している。なお、比較のため、これらの図中には、炭素鋼の残留応力モデル⁸⁾を破線のみで示している。本研究で提案した残留応力分布モデルの値は、引張残留応力で $0.42\sigma_{0.2}$ 、圧縮残留応力で $-0.19\sigma_{0.2}$ である。この圧縮残留応力の大きさは、溶接組立てした高強度鋼製部材で測定された残留応力の実測値⁹⁾とほぼ同等である。また、提案する残留応力分布モデルの大きさは、板部材の強度に最も影響を及ぼすとされる図 6、図 7 および図 8 中の炭素鋼の残留応力分布モデルの値の引張側で約 42%、圧縮側で約 63%となる。今後、これらの残留応力分布モデルの形状と大きさについては、様々な断面形状や溶接条件などより多くの実測データを検証した上で、本研究で提案した内容を更新していくことが望まれる。

4. 結論

本研究では、リーン二相系ステンレス鋼 SUS323L および炭素鋼 SM570 を溶接組立した断面の溶接残留応力を実験により明らかにした。以下では、本研究により得られた結果をまとめる。

(1) リーン二相系ステンレス鋼 SUS323L のみで構成される溶接 I 形断面および溶接箱形断面の残留応力の分布形状は、断面寸法および供試体形状の違いによらず同様である。

(2) 上フランジのみを SM570 とした SUS323L との溶接ハイブリッド I 形断面の残留応力の大きさおよび分布形状は、SUS323L のみの結果と同等以下である。

(3) SUS323L のみの全供試体の測定結果より算出した残留応力分布モデルは、 0.2% 耐力に対して引張残留応力で約 0.42 倍、圧縮残留応力で約 -0.19 倍の大きさとなる。

(4) また、SUS323L のみの全供試体の測定結果より算出した残留応力分布モデルの傾向は、既往の炭素鋼の残留応力分布モデルと同様である。

最後に、本研究は、日本溶接協会平成 28 年度若手研究助成の支援により実施した。また、本研究に用いた供試体は、日本鋼構造協会より提供頂いた。さらに、本研究の実験実施にあたり、本校環境都市工学科構造工学研究室の学生に協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 日本工業規格協会: JIS G4304 熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯 (追補 1), 日本工業規格協会, 2015.
- 2) 佐藤信輔, 宮寄靖大: 静的引張試験による二相系ステンレス鋼の材料特性, 鋼構造年次論文報告集, 第 24 巻, pp. 297-304, 2016.
- 3) 宮寄靖大, 奈良敬: ステンレス鋼板の面内純せん断強度特性および強度評価法, 鋼構造年次論文報告集, 第 22 巻, pp. 72-78, 2014.
- 4) 和田勇輝, 宮寄靖大: ステンレス鋼と構造用炭素鋼で構成される I 形断面梁の曲げ強度特性および曲げ強度評価法, 構造工学論文集, Vol. 63A, pp. 92-105, 2017.
- 5) N. Saliba, L. Gardner: Cross-section stability of lean duplex stainless steel welded I-sections, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 80, pp. 1-14, 2013.
- 6) Y. Miyazaki, K. Komi, Galvanic corrosion behavior of the welding of stainless steel and carbon steel, Mechanics of Structures and Materials: Advancements and Challenges - Hao & Zhang (Eds), pp. 207-213, 2016. 12.
- 7) 上田幸雄, 福田敬二, 中長啓治, 円道節夫: 残留応力の有限要素法に基づく測定原理と推定値の信頼性, 日本造船学会論文集, No. 138, pp. 499-507, 1975.
- 8) 土木学会鋼構造委員会座屈設計ガイドライン改訂小委員会: 鋼構造シリーズ 12 座屈設計ガイドライン 改訂第 2 版[2005 年改訂版], 土木学会, 2005.
- 9) 小松定夫, 牛尾正之, 北田俊行: 補剛板の溶接残留応力および初期たわみに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 265, pp. 25-35, 1977.