

テーパ鋼板およびそれを用いた箱桁の初期不整に関する実測と考察

Measurements of initial imperfections of longitudinally profiled steel plates and their applied box cross section

熊野拓志*, 鈴木康夫**, 北原武嗣***, 杉浦邦征†, 山口隆司††,
Takuji Kumano, Yasuo Suzuki, Takeshi Kitahara, Kunitomo Sugiura, Takshi Yamaguchi

*博(工), JFE エンジニアリング(株), 鋼構造事業部橋梁設計部 (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町 2-1)

** 博(工), 宇都宮大学大学院助教, 工学研究科地球環境デザイン学専攻 (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

*** 博(工), 関東学院大学准教授, 工学部社会環境システム学科 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東 1-50-1)

† Ph. D., 京都大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

†† 博(工), 大阪市立大学大学院准教授, 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

Recently, various kinds of high-performance steel have been developed in order to reduce construction costs and improve structural performances. LP steel plate is applied to flange plates of steel girders with a view to reduction of process for fabrication and simplifying structures. On the other hands, it is generally known that initial imperfections of steel plates affect on the characteristics of strength and deformation of steel girders. Therefore, in this study, the fabrication error of plate thickness and the residual stress distribution subjected to metal rolling and welding are measured for the actual LP plate and box cross section in order to correct the basic information of initial imperfections of LP steel plates.

Key Words: LP steel plate, initial imperfection, residual stress, plate thickness
キーワード: LP 鋼板, 初期不整, 残留応力, 板厚

1. はじめに

近年, 社会資本の建設においては, 建設コストの縮減や耐久性の向上, 維持管理費の削減などが強く求められており, これらの要求に対応するため種々の高機能鋼材が開発, 実用化されている. 高機能鋼材の 1 種であるテーパ鋼板 (Longitudinally Profiled Steel plate, 以下 LP 鋼板とする)¹⁾は, 圧延方向に連続的に板厚を変化させた鋼板であり, 製作工数の低減や構造の簡素化を目的として鋼桁のフランジ材等への適用を検討した研究^{2),3)}や実橋梁へ適用された事例⁴⁾等が報告されている. 特に, 一ブロッカー断面とするガイドライン設計⁵⁾において有効性が高い.

また, 上述のように部材軸方向の板厚変化を利用するのではなく, 板幅方向の板厚変化を利用した研究も行われている^{6)~8)}. これらは断面内の応力伝達性状に着目したものである. 奈良・箕島⁶⁾は桁高方向に板厚が連続的に変化する鋼桁腹板の座屈設計法について, 著者ら^{7)~9)}は周辺単純支持板や自由突出板を対象とし, 板厚変化が圧縮強度, 変形性能やエネルギー吸収能に与える影響に

ついて検討している.

一方, 鋼桁や鋼板の強度特性や変形性能には, 残留応力, 初期たわみ, 製作誤差等の初期不整が大きく影響することが一般的に知られている¹⁰⁾. したがって, これらの初期不整の特性を把握することは重要な課題である. これまでに等厚鋼板を対象とした研究^{11),12)}は複数報告されており, 十分な知見の蓄積がなされている¹⁰⁾. しかしながら, LP 鋼板に関する研究はほとんどなされていないのが現状である.

そこで本研究では, LP 鋼板や LP 鋼板を使用した鋼桁などの強度特性や変形性能を評価するために重要となる, LP 鋼板の様々な初期不整に関する基礎的データを収集し, LP 鋼板の初期不整について考察した. すなわち, LP 鋼板単体を供試体とし, 鋼板圧延時の影響による残留応力分布性状と板厚の製作誤差を, さらに, LP 鋼板を用いて製作した鋼箱桁を供試体とし, 溶接の影響による残留応力分布性状の実測と考察を行った.

なお, 圧延による残留応力に関しては, 板幅および板長手方向の残留応力分布のみでなく, 板厚方向の残留応力分布に関しても計測し, 考察を行った.

2. 初期不整の計測

2.1 計測種類

本研究では、以下のような計測を行った。

- ① 圧延製造された LP 鋼板の板厚計測,
- ② LP 鋼板の圧延による残留応力計測 (応力緩和法),
- ③ LP 鋼板の板厚方向の残留応力計測 (逐次除去法),
- ④ LP 鋼板を上下フランジに用いた箱桁の溶接による残留応力計測 (応力緩和法),
- ⑤ LP 鋼板を上下フランジに用いた箱桁の溶接による残留応力計測 (センターホール式穿孔法).

2.2 使用鋼板

本計測では、テーパー鋼板のうち長手方向に板厚を変化させた LP 鋼板 (凸型等厚部付 2 方向 LP 鋼板(LP4)) を対象とした。設計時の供試体寸法は、12900mm×2400mm で最小板厚 19mm, 最大板厚 34mm とした。なお、板厚勾配は 7.06mm/m および 5.00mm/m と急勾配の板厚構成とした。材質は SM520B である。

使用した鋼材の機械的性質を調べるため引張試験を行った。引張試験片は JIS1 号試験片とし、板厚 19mm 部分から長手方向 (圧延方向) に 1 本、幅方向に 1 本の計 2 本、板厚 22mm 部分から長手方向に 1 本、幅方向に 1 本の計 2 本、板厚 34mm 部分から長手方向に 3 本、幅方向に 3 本の計 6 本、合計 10 本切り出した。

板厚別の引張試験結果を表-1 に示す。長手方向と幅方向では降伏点、引張強さおよび伸びに違いはほとんど見られなかったため、長手方向と幅方向の平均値を表-1 に示している。

表-1 引張試験結果のまとめ

板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	ポアソン比
19	359.3	519.6	24.5	0.28
22	341.2	508.6	28.0	0.28
34	335.0	504.7	29.7	0.28

降伏点に関しては、板厚 22mm と 34mm では約 340N/mm² であるのに対し、板厚 19mm では約 360N/mm² と 6% 程度大きな値を示している。引張強さに関しては、板厚 34mm では約 505 N/mm², 22mm では約 510 N/mm², 19mm では約 520 N/mm² と板厚が小さくなるにつれて引張強さが大きくなっているが、その差はたかだか 3% 程度である。一方、伸びについては板厚が大きくなるにつれて大きくなる傾向を示している。

一般的に、板厚の薄い等厚板は板厚が厚いものより降伏強度や引張強さが大きくなる傾向がある。これと同様、一枚の変厚板の薄い部分と厚い部分でも同様の傾向が見られることがわかる。

2.3 板厚計測

LP 鋼板の初期不整として板厚の製作誤差を考慮し、実際の板厚と公称値を比較するため、超音波精密厚さ計を用いて 1/100mm のオーダーで板厚を計測した。計測点は、図-1 に示すとおり長手方向においては上側から 200mm の x-line, 1400mm の y-line の 2 測線、幅方向においては a-line~h-line の 8 測線とした。

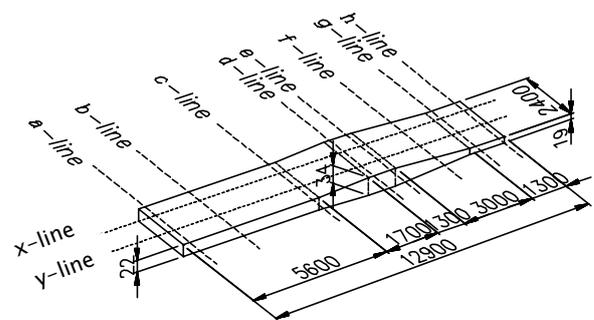


図-1 板厚および残留応力計測位置 (単位: mm)

2.4 圧延による残留応力計測

残留応力の計測手法は、切断前後のひずみ測定により解法ひずみを調べることで残留応力を計る応力緩和法を用いた。単軸ひずみゲージを貼付、養生した上で初期ひずみを計測、ガス切断により 300mm x 200mm 程度の短冊状に切り出した後、ノコ切断により 300mm x 120mm の短冊状に細分化した。ひずみ解放後、再度ひずみ計測を行った。

圧延による残留応力の計測は、図-1 に示すように等厚区間および板厚変化区間の 8 測線 (a-line~h-line) を計測位置とした。各測線においてそれぞれ 20 箇所、1 箇所につき表裏両面 2 枚、計 40 枚の単軸ひずみゲージを圧延方向 (長手方向) に貼付した。8 測線で合計 40×8=320 枚のゲージで長手方向の残留応力分布を計測した。なお、d-line のみ 5 箇所に表裏両面、板幅方向に単軸ひずみゲージを貼付、板幅方向の残留応力分布も計測した。

2.5 板厚方向の残留応力計測

板厚が 34mm と最も大きい d-line 中央部から試験片を取り出し、板厚方向の残留応力分布を計測した。残留応力測定には逐次除去法を用いた。逐次除去法は、原理的に単純で利用範囲の広い基本的な測定方法である。

図-2 に示すように、試験片の片側表面から逐次除去を行い、除去の反対側裏面に貼付けたひずみゲージで計測するひずみの変化から、各板厚方向位置での残留応力を求める方法である。逐次除去法の詳細は、文献 13) を参照されたい。

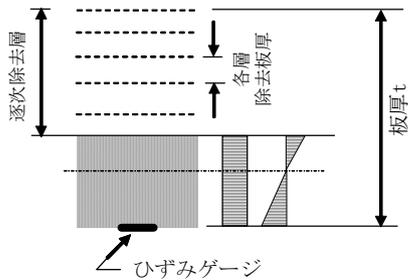


図-2 逐次除去法の概念図

2.6 箱桁の残留応力計測

2.2で述べたLP鋼板を切り出し、図-3に示すような箱桁を製作した。圧縮フランジは板厚勾配の大きなLP鋼板、引張フランジは板厚勾配の小さなLP鋼板を使用している。ウェブは等厚板である。

箱桁作成時の溶接による残留応力分布を応力緩和法により計測した。圧縮フランジ、引張フランジともに図-3に示すように3測線に沿って計測した。それぞれの測線において20箇所を表裏両面に単軸ひずみゲージを貼付、残留応力を求めた。

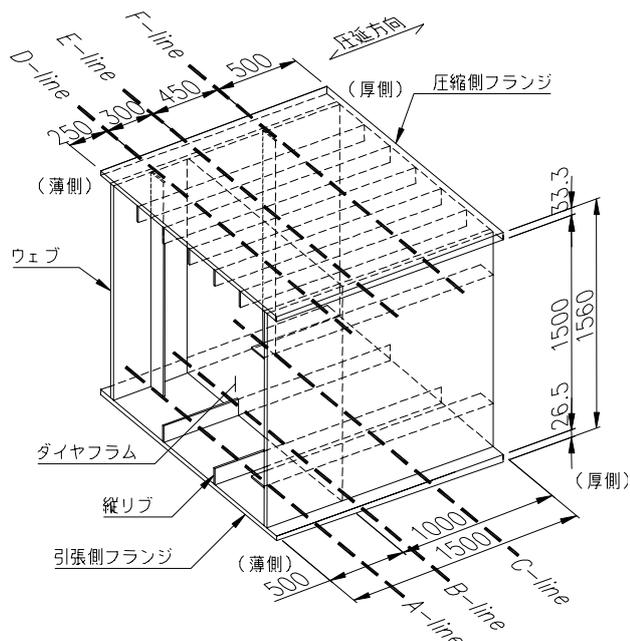


図-3 箱桁の残留応力計測位置 (単位: mm)

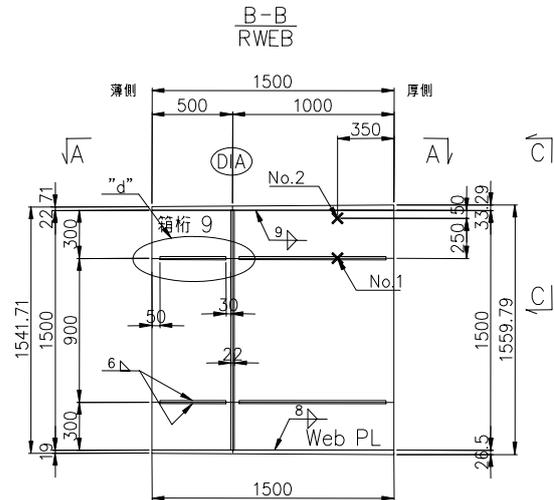
2.7 センターホール式穿孔法による残留応力計測

応力緩和法では、短冊状に切断してひずみを測定するため、ダイヤフラムやリブ等の近傍では、適用が困難である。このような位置での残留応力測定を検討するため、センターホール式穿孔法^{14), 15), 16)}による計測を行った。センターホール式穿孔法は、中心マークを持つロゼットゲージを使用し、穿孔機によってゲージ中心位置を穿孔することで応力解放を行い測定するものである。今回はエアブレイジブと呼ばれる穿孔機を用いた。

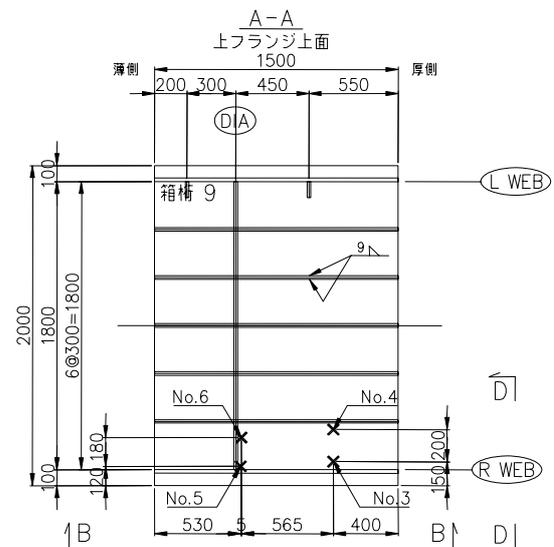
本手法を用いると、短冊状に試験片を切り出すことな

く、ロゼットゲージ中心部の残留応力を主応力として求めることができる。センターホール式穿孔法の詳細は、文献14)を参照されたい。

図-4に、センターホール式穿孔法により残留応力を測定した地点を示す。ウェブにおいてはNo.1とNo.2の2地点、圧縮フランジでは、F-line近傍としてNo.3とNo.4の2地点、E-line近傍としてNo.5とNo.6の2地点で計測した。



(a) ウェブ



(b) 圧縮フランジ

図-4 センターホール式穿孔法による残留応力計測位置 (単位: mm)

3. 実測結果および考察

3.1 板厚精度

圧延によるLP鋼板の初期不整として、板厚精度に関して検討を行った。図-5に、計測したすべての測線に関する板厚分布を示す。また図-6には、公称板厚22mmのa-line、公称板厚34mmのd-line、および板厚変化部のf-lineの3測線での板厚分布を示す。図の縦軸は実測板厚を、横軸は幅方向の計測位置を表している。

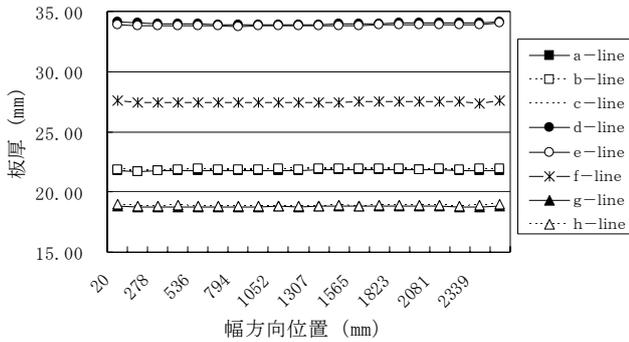
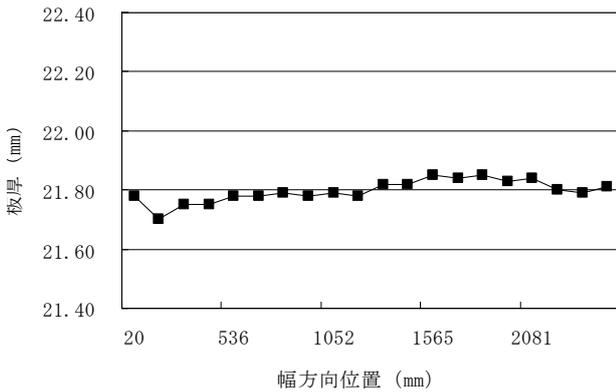
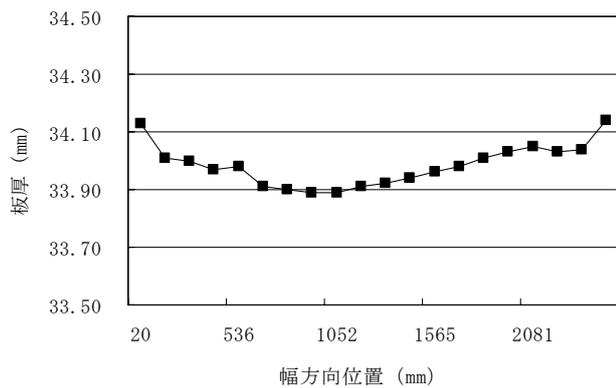


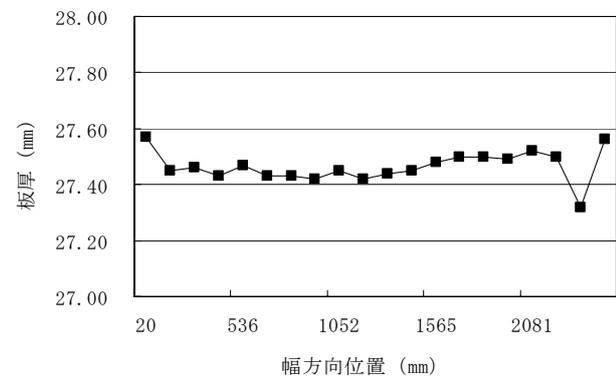
図-5 板厚分布 (全測線)



(a) a-line



(b) d-line



(c) f-line

図-6 板厚分布 (板幅方向)

図-5 より、すべての測線において板厚変動は小さいことがわかる。また、同一設計板厚である a-line～

c-line (22mm), d-line と e-line (34mm), および g-line と h-line (19mm) は、それぞれ、設計板厚近傍において同様の分布を示している。図-6 より、板厚の異なる a-line, d-line, f-line を比較すると、板幅方向の分布に特定の傾向を有していないこともわかる。また、板厚変化部の f-line においても、特段、板厚分布に大きな変動はみられない。

板幅方向の板厚計測結果を表-2 にまとめる。すべての測線で設計板厚よりも若干小さめの平均板厚となっているが、誤差は 0.06～1.06%と小さい値である。板厚が厚いほど誤差は小さくなる傾向もみてとれる。板幅方向の厚さの変動係数も 0.17～0.25%程度と小さく、板厚による傾向は特に認められない。

表-2 板厚平均値と変動係数

測線	設計板厚 (mm)	平均板厚 (mm)	変動係数 (%)	誤差 (%)
a-line	22.0	21.80	0.17	0.91
b-line	22.0	21.89	0.25	0.50
c-line	22.0	21.95	0.18	0.23
d-line	34.0	33.98	0.22	0.06
e-line	34.0	33.84	0.17	0.47
f-line	—	27.46	0.20	—
g-line	19.0	18.78	0.19	1.06
h-line	19.0	18.87	0.23	0.68

つぎに、長手方向の板厚計測結果を図-7 に示す。縦軸に計測板厚を、横軸に計測位置を示す。また、□は x-line の板厚、●は y-line の板厚を表しており、点線で板厚公差の上下限界を示している。この図より、x-line と y-line で長手方向の板厚分布に大きな差異は生じておらず、板厚変化部と等厚部のすべての計測位置において JIS で定められた板厚公差の上下限界の範囲内に収まっていることがわかる。

これらの結果から、板厚変化部においても、等厚部と同様に十分な板厚精度が確保されていると判断できる。

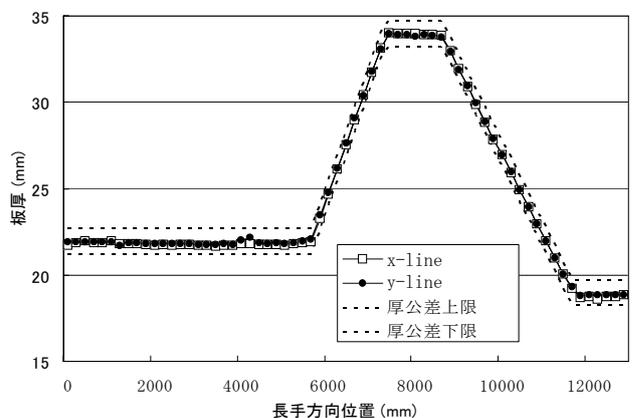


図-7 板厚分布 (長手方向)

3.2 圧延による残留応力（板幅および長手方向）

圧延による残留応力計測結果の一例として、最大板厚部（d-line,板厚34mm）における圧延方向（長手方向）および板幅方向の応力分布を図-8に示す。縦軸は降伏応力で無次元化した残留応力（正が引張応力）を、横軸は鋼板端部からの距離を表している。また、●で長手方向の残留応力分布を、○で板幅方向の残留応力分布を示している。なお、ここで示した残留応力の値は板表面と裏面で計測した値の平均値である。

圧延方向については、鋼板端部で $0.57\sigma_y$ の圧縮残留応力が、また中央部付近で $0.1\sigma_y$ 程度の引張残留応力が生じており、等厚鋼板と類似した残留応力分布^{11), 12)}である。冷却過程において鋼板端部から硬化し、徐々に板中央部が硬化していくため、端部で圧縮応力が発生すると考えられる。

一方、板幅方向の残留応力については、鋼板端部で $0.12\sigma_y$ の引張応力が、中央部では $0.02\sigma_y$ 程度の圧縮応力が生じており、板幅方向の残留応力は、長手方向の残留応力の0.2倍程度の大きさで正負逆の残留応力分布となることが確認できる。このような分布となるのは、ポアソン効果によるものと考えられる。

板幅方向の残留応力と長手方向の残留応力との比から算出されるポアソン比は0.21となる。この値は、表-1に示した引張試験結果より求められるポアソン比0.28より小さくなっている。これは、圧延鋼板の冷却過程における温度変化に伴う温度依存性が影響していると考えられる。

LP鋼板全体における圧延方向の残留応力分布を、図-9に示す。縦軸は降伏応力により無次元化した残留応力を示している。長手方向に残留応力分布の変化をみると、板厚が増加するにしたがって、残留応力絶対値が若干増加する傾向が認められた。また、 $0.4\sigma_y$ を越えるような残留応力が生じているのは、板幅方向両端部の限られた範囲のみであることもわかる。板厚が厚いほど残留応力が大きくなるのは、熱量の違いにより厚い方が冷却されにくいからであると考えられる。

つぎに、各測線ごとに長手方向の残留応力による合力を求めたところ、-250N（d-line）～900N（e-line）程度の値となった。これらの値は最大でも降伏荷重の1/1000程度と非常に小さく、概ね自己釣り合いがとれている状態と考えられる。残留応力による合力が0にならなかった原因の一つとして、本来なら連続的に変化する残留応力の値を、短冊状に切断した試験片ごとの離散的な値として合力を求めたことが考えられる。

また、ここでは、板表裏面における残留応力の平均値に各試験片の平均断面積を乗じて合力を求めたが、残留応力は板幅方向のみではなく、板厚方向にも分布していると考えられる。これも残留応力による合力が0にならなかった理由の一つであると考えられる。

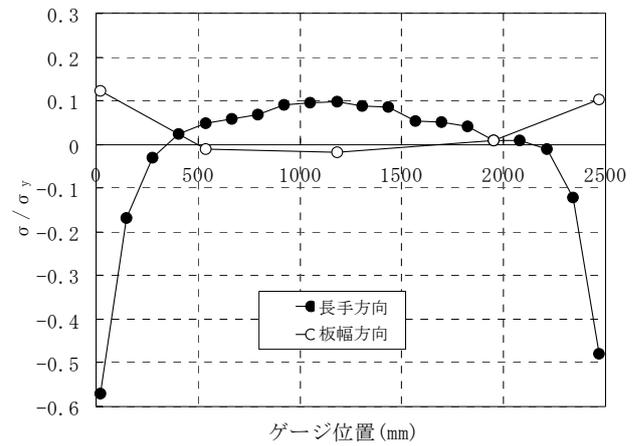


図-8 残留応力分布 (d-line)

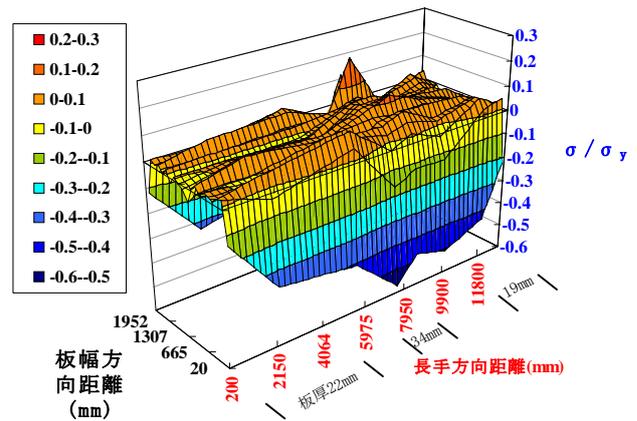


図-9 残留応力分布（圧延方向）

3.3 圧延による残留応力（板厚方向）

板厚方向の残留応力分布を、図-1に示した d-line の中央部を切り出した試験片を用いて計測した。計測した部位はもっとも板厚の厚い 34mm の部分である。なお、板厚方向の残留応力分布は、板厚中央部を対称軸として上下方向で対称と考えられるため、板表面から板中央までの計測を行った。計測結果を図-10に示す。

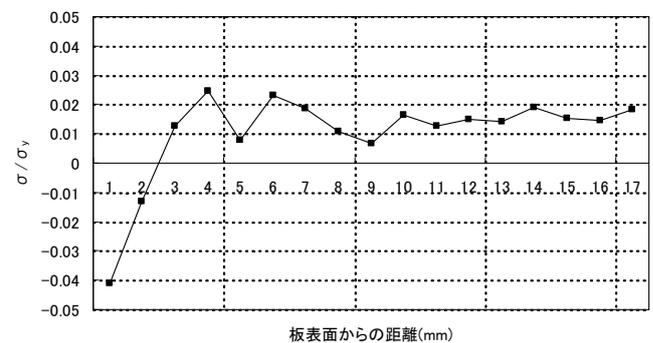


図-10 板厚方向残留応力分布

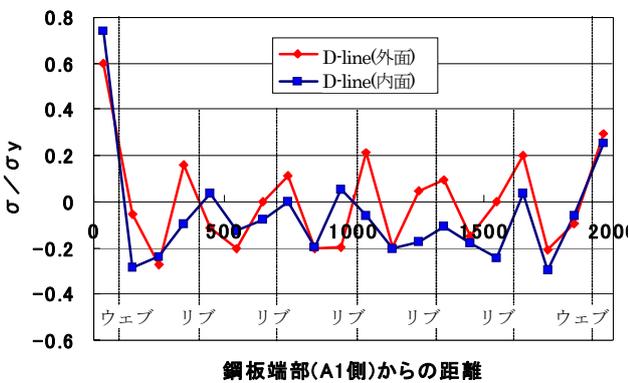
図より、LP鋼板の板厚方向の残留応力分布についても、等厚の軟鋼による既往の結果¹⁷⁾と同様に、板表面では圧縮応力が生じており、板中央部に向かうにしたがって引張応力に変化することがわかる。このような残留応力分布となるのは、冷却過程において表面から硬化し徐々に内部

が硬化していくためであると考えられる。

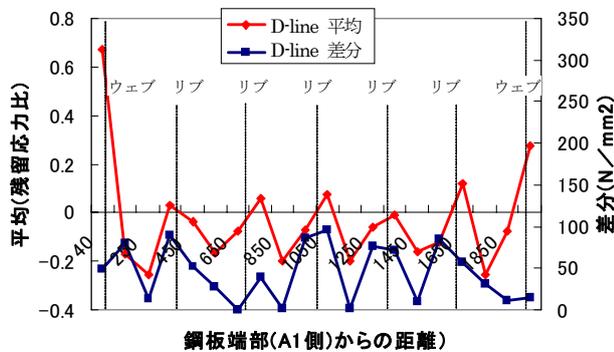
LP 鋼板においても板厚方向に残留応力が分布していることが確認できた。前節で述べたように、板表裏面で計測された残留応力を基に算出した際、残留応力による合力が0にならなかった原因の一つとして、板厚方向にも残留応力が分布することも影響していると推測できる。

3.4 溶接による残留応力 (箱桁)

箱桁残留応力の計測結果の一例として、圧縮フランジ D-line (板厚 24.47mm) における外面, 内面の桁軸方向の残留応力分布を図-11(a)に、またその平均, 差分の分布を図-11(b)に示す。図中、破線でウェブと縦リブの位置を示している。



(a) フランジ外面および内面の残留応力分布



(b) 内外面平均残留応力と内外面差分

図-11 箱桁圧縮フランジの桁軸方向残留応力分布

切断施工上の制約により、ゲージ貼付位置は縦リブ中心線から 50mm としたため、溶接残留応力のピーク値は計測できなかったものの、既往の研究例¹⁰⁾と同様に溶接部近傍で引張残留応力が、また縦リブ間で 0.2 σ_y 程度の圧縮の残留応力が発生していることを確認した。

板幅中央付近のリブ間では加工前の引張残留応力状態から圧縮状態へ移行している。圧延、切断、溶接による残留応力の蓄積、解放メカニズムについては今後の課題である。

また、ウェブ近傍では 0.67 σ_y に達する大きな引張残留

応力を計測した。表裏の応力差は、縦リブやウェブによる変形拘束や鋼板厚などの影響によるものと思われる。

3.5 センターホール式穿孔法による残留応力計測

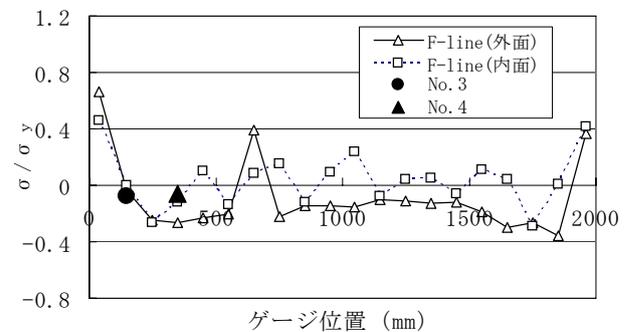
センターホール式穿孔法により、箱桁の溶接による残留応力分布を計測した結果を表-3 に示す。

No. 1 は、ウェブ内面のリブ溶接によりウェブ内面に引張応力が残留するため、ウェブ外面の No. 1 に圧縮の残留応力が生じている。No. 3, No. 4 および No. 6 は、No. 1 と同様、圧縮フランジ内面のリブ溶接の影響により圧縮の残留応力が生じている。No. 5 はフランジ内面のリブおよびウェブとの溶接の影響があり、応力状態を考察することは難しいが、結果として小さな引張残留応力状態となっている。

表-3 残留応力計測結果 (センターホール式穿孔法)

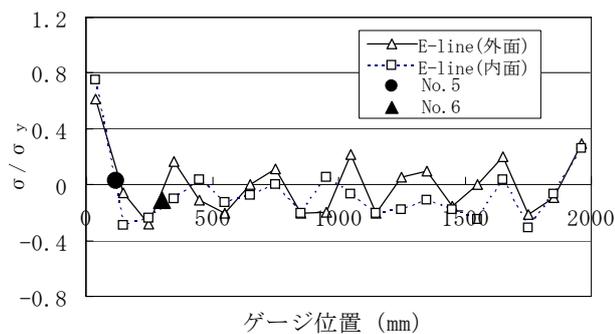
位置	残留応力			長手方向残留応力	
	最大主応力 (N/mm ²)	最小主応力 (N/mm ²)	角度 (deg.)	σ (N/mm ²)	σ / σ_y
No.1	-17.72	-20.71	35.4	-18.72	-0.055
No.2	-18.55	-29.02	57.7	-26.03	-0.076
No.3	-17.29	-31.62	50.7	-25.87	-0.077
No.4	-13.48	-25.54	53.0	-21.17	-0.063
No.5	10.00	-0.70	-9.1	9.73	0.029
No.6	-20.31	-38.11	86.3	-38.04	-0.111

センターホール式穿孔法の計測結果から箱桁長手方向の残留応力成分を計算し、これらの値と応力緩和法による残留応力計測値との比較を行った。No. 3 と No. 4 は近傍の測線である F-line の残留応力分布と、No. 5 と No. 6 は E-line の分布と比較したものを、それぞれ、図-12(a)と図-12(b)に示す。同一計測点でないため直接比較はできないものの、応力緩和法とセンターホール式穿孔法による残留応力測定値は、ほぼ同様の傾向を示していることがわかる。



(a) F-line 近傍

図-12 残留応力計測結果



(b) E-line 近傍

図-12 残留応力計測結果 (続き)

ダイヤフラムやリブ近傍など、短冊状に切断困難なため応力緩和法の適用が難しい個所において、センターホール式穿孔法を残留応力計測に適用できることを確認した。ただし、センターホール式穿孔法による残留応力計測において計測誤差 5~30%程度との測定事例⁶⁾も報告されており、計測精度の確認が課題である。

4. まとめ

本研究では、LP 鋼板の初期不整に着目し、板厚の製作誤差、圧延および溶接による残留応力分布性状について実測し考察を加えた。以下に得られた結論を簡単にまとめる。

- (1) 板厚誤差は最大でも 1%程度であり、長手方向、板幅方向ともに大きな変動は生じていなかった。また、変厚部においても、等厚部と同様の板厚精度が確保されていることを確認した。
- (2) LP鋼板の圧延による長手方向の残留応力分布は、等厚鋼板の場合と同様、鋼板端部で圧縮残留応力、鋼板中央部で引張残留応力が生じることを確認した。この際、圧縮残留応力は最大で $0.57\sigma_y$ 程度、引張側で $0.1\sigma_y$ 程度であった。また、板厚が大きい個所ほど最大残留応力の値も大きくなることを確認した。
- (3) 圧延による板幅方向の残留応力分布は、長手方向と圧縮・引張が逆になる残留応力が生じており、最大で $0.12\sigma_y$ 程度と長手方向残留応力よりも小さい。
- (4) 圧延による板厚方向の残留応力分布は、板表面で圧縮残留応力が生じ、板中央部では引張残留応力が生じることを確認した。これは、等厚鋼板と同様の傾向である。
- (5) LP 鋼板をフランジに用いた箱桁を対象と溶接による残留応力分布を検討した結果、等厚板と同様、溶接部近傍で引張残留応力、その他の個所で圧縮残留応力が生じることが確認できた。
- (6) 応力緩和法の適用が困難な個所において、センターホール式穿孔法による残留応力計測が可能であることを確認した。計測精度の確認が課題として残る。

LP 鋼板に関する初期不整に関する十分な情報がない現状において、定性的には LP 鋼板においても等厚の普通鋼とほぼ同様の初期不整の傾向を示すことが確認できた。鋼桁や鋼板の強度特性や変形性能を評価するためには、より定量的なデータを示すことが今後の課題であるといえる。また、圧延と溶接による残留応力の蓄積、解放のメカニズムの解明等につなげるためにも、さらなるデータの蓄積が必要といえる。

謝辞

本研究を実施するに際し、小木崇広氏（当時 京都大学大学院修士課程在籍学生）には実験およびデータ整理にご協力いただいた。また、(株)東京測器研究所からセンターホール式穿孔法による残留応力計測機器ならびにデータロガーをお借りしました。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) (社)日本鋼構造協会・合理化桁の設計法研究小委員会：合理化桁に関するデザインマニュアル，pp.205-260，2000。
- 2) 堀田毅，西村宣男，村上茂之，滝英明：テーパプレートフランジ桁の耐荷力特性と設計法，鋼構造年次論文報告集，第4巻，pp.257-264，1996。
- 3) 奈良敬，村上茂之，都竹哲朗，森脇幸次，庄司眞：圧延変厚鋼板をフランジに用いた鋼 I 桁の曲げ載荷試験，鋼構造年次論文報告集，第10巻，pp.181-188，2002。
- 4) 例えば，谷俊寛，西前博一，岡村公司：テーパプレートをフランジ材に用いた I 桁の施工試験—上信越自動車道深沢川橋（鋼上部工）工事—，高田機工技法，No.11，pp.16-21，1995。
- 5) (社)日本橋梁建設協会：ガイドライン型設計適用上の考え方と標準図集，1998。
- 6) 奈良敬，簗島茂樹：変厚鋼板を腹板に用いた鋼桁断面の極限曲げ強度，鋼構造年次論文報告集，第5巻，pp.255-260，1997。
- 7) 杉浦邦征，山口隆司，熊野拓司，渡邊英一：板幅方向にテーパを有する鋼製周辺単純支持板の圧縮強度と変形能，土木学会論文集，No.780/I-70，pp.231-239，2005。
- 8) 鈴木康夫，山口隆司，熊野拓司，杉浦邦征，渡邊英一：板幅方向にテーパを有する鋼製自由突出板の圧縮強度と変形能，土木学会論文集 A，Vol.62，No.3，pp.531-542，2006。
- 9) 熊野拓志，山口隆司，杉浦邦征，鈴木康夫，橋本國太郎：軸方向および幅方向テーパ鋼板の圧縮強度評価方法の一提案，鋼構造論文集，Vol.15，No.57，

- pp.87-102, 2008.
- 10) 土木学会：座屈設計ガイドライン，2005.
 - 11) 麻寧緒，村川英一，上田幸雄：初期圧延残留応力が溶接残留応力に及ぼす影響，溶接学会全国大会講演概要，第57集，1995.
 - 12) 谷徳孝，小林克壯，大江憲一，上田太次，岡田順応，宮崎建雄：残留応力制御型 TMCP 鋼板の開発と有効性検証，神戸製鋼技報，Vol.52，No.1，2002.
 - 13) 米沢茂：残留応力の発生と対策，養賢堂，1975.
 - 14) American Society for Testing and Materials: Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, ASTM E837-99, 2008.
 - 15) (株)東京測器研究所：製品総合カタログ 2007-2008, p. 92.
 - 16) (株)東京測器研究所：エアブレイジブ・センターホール残留応力測定法，社内資料.
 - 17) 藤井堅，三木千壽，寺田宏行，田中和成，有尾一朗：ステンレスクラッド鋼の材料特性および残留応力とその発生メカニズム，構造工学論文集, Vol. 44A, pp. 103-114, 1998.

(2008年9月18日受付)