極厚フランジを有する鋼I桁の溶接残留応力の計測方法の提案と終局曲げ耐力に与える影響

宮下 剛¹・稲葉 尚文²・平山 繁幸³・劉 翠平⁴・長井 正嗣⁵

¹正会員 長岡技術科学大学産学融合特任講師 産学融合トップランナー養成センター
(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail: mtakeshi@vos.nagaokaut.ac.jp

²正会員 中日本高速道路(株) 福井保全・サービスセンター (〒910-2177 福井県福井市稲津町16-7)
E-mail: n.inaba.aa@c-nexco.co.jp

³正会員 (株)東京鐵骨橋梁 技術研究所 (〒302-0038 茨城県取手市下高井1020)
E-mail: Shigeyuki_Hirayama@ttk-corp.co.jp

⁴正会員 長岡技術科学大学・産学官連携研究員 産学融合トップランナー養成センター
(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail: liu@stn.nagaokaut.ac.jp

⁵正会員 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail: nagai@nagaokaut.ac.jp

少数I桁橋の普及に伴い、板厚が50mmを超える極厚鋼板の使用が増えている。厚板の残留応力が鋼桁の耐力に影響を与えることが懸念されるものの、残留応力の実測データが乏しく、過去のデータにもとづいた耐力曲線が使用されている。本研究では、主桁腹板と厚板フランジの溶接部を模擬した試験体を製作し、フランジ板幅方向と板厚方向に分布する残留応力を応力解放法により計測した。板厚方向の計測では、計測の厳密さや正確さをある程度犠牲にした簡便な計測手法を提案し、板厚が厚くなると、溶接部から板厚方向に応力勾配が大きくなる残留応力分布を得た。そして、残留応力の自己釣り合いを三次元的に考慮し、実橋梁の中間支点部を対象とした弾塑性有限要素解析から、厚板の残留応力分布は鋼桁の終局曲げ耐力に対して影響を与えないことを確認した。

Key Words : thick steel plate, residual stress, welding, steel girder bridge, load carrying capacity

1. はじめに

近年、様々な分野で極厚鋼板が構造用鋼材として頻繁に使用されている。土木分野では、1996年の道路橋示方書¹⁾の改訂により、鋼橋における板厚の適用範囲が最大100mmまで拡大され、少数I桁橋などの合理化設計を背景として、板厚が50mm以上の極厚フランジを有する鋼橋が多く建設されている。

設計基準における耐力曲線は過去のデータにもとづくため、厚板の実験データはほとんど含まれていない²⁾。鋼橋の競争力をさらにアップさせるためには、欧州の中スパンの桁橋のように100mmを超す厚板の使用が考えられるが、厚板を用いた構造に関する耐力や残留応力等のデータが十分ではない。

従来、残留応力が鋼桁の耐力に影響を与えるという

ことが知られている³⁾ものの、これまでは、薄板を対象としていたため、板厚方向の残留応力分布を一定としている³⁾。一方、厚板では、圧延後の冷却過程やガス切断、溶接熱の影響により、板厚方向に残留応力分布が変化すると考えられるが、計測が難しく、手間を要することから実測データが少ない現状にある^{4)~7)}。特に、溶接継手に関しては、板幅方向の残留応力計測から、板厚が厚くなるとフランジ上下面で残留応力に差が生じて板厚方向に残留応力が分布することを示唆する研究⁷⁾があるものの、板厚方向の溶接残留応力分布の実測データは、著者らが知る限り文献8), 9)の数例のみである。

また、文献6)では、極厚鋼板の板厚方向に分布する残留応力の計測を行い、残留応力が鋼桁の耐力に与える影響を検討しているものの、圧延などの製造過程で発生する残留応力を対象としており、溶接残留応力について

図-1 T形試験体 (単位: mm)

図-2 帯鋸切断機

表-1 T形試験体の諸量

タイプ			A					B				
試験体名			A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
フランジ	板厚	mm	23	30	50	70	88	23	30	50	70	88
	鋼種	—	SM490YB		SM520C-H			SM490YB		SM520C-H		
	降伏点	MPa	453	456	397	410	365	453	456	397	410	365
腹板	板厚	mm	20					20				
	高さ	mm	110					610				
	鋼種	—	SM490YB					SM490YB				
	降伏点	MPa	449					449				
溶接脚長		mm	7	8	10	12	14	7	8	10	12	14
試験体数	板幅方向	—	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	板厚方向	—	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

は検討されていない。このため、極厚鋼板の溶接残留応力が鋼桁の耐力に与える影響は明確ではない。

そこで、本研究では、極厚鋼板を使用した鋼I桁橋を対象として、以下を研究の目的とする。

- 1) 溶接継手を有する極厚鋼板の残留応力分布を把握する。
- 2) その溶接残留応力が鋼 I 桁の終局曲げ耐力に与える影響に関する基礎的な検討を解析的に行う。

研究目的1)では、極厚鋼板を溶接接合してフランジと腹板を模擬したT字形の試験体を製作し、フランジ板幅方向と板厚方向に分布する溶接線方向の残留応力を機械式切断法で計測する。板厚方向の残留応力計測では、溶接線方向が法線方向となる平面で切断した際に、解放される残留応力が最も大きくなると考え、計測の厳密さや正確さをある程度犠牲にして、文献9)の計測手法よりも簡便にした計測手法を提案する。

研究目的2)では、極厚鋼板の溶接残留応力が鋼I桁の終局曲げ耐力に与える影響を検討する。具体的には、極厚鋼板を使用した実橋梁の中間支点部を対象として、弾塑性有限要素解析を行うこととし、研究目的1)で得られた残留応力分布を有限要素解析モデルに導入して、その終局耐力を把握する。

2. 残留応力計測の概要

(1) はじめに

実橋梁のフランジに使用された極厚鋼板と同鋼種の鋼板を溶接接合してフランジと腹板を模擬したT字形の試験体（以下、T形試験体）を製作した。そして、T形試験体から幅が小さい試験体を切り出し、その残留応力を計測する。計測対象とする残留応力は、フランジ板幅方向と板厚方向に分布する溶接線方向の残留応力である。

(2) 計測概要

a) 試験体

製作したT形試験体の形状を図-1に、その寸法を表-1に示す。試験体は大きく分け、腹板の高さに応じて2種類あり、腹板の高さを110mmとしたType Aと610mmとしたType Bである。これらは、腹板の高さが残留応力分布に与える影響を調べるために用意した。フランジの幅は実橋梁のフランジ幅とほぼ同じ800mmである。また、全ての試験体の腹板厚を20mmと一定にした。これは、対象とする実橋梁の主桁腹板厚の平均値に相当する。

本研究では、フランジの板厚が残留応力分布に与える影響を把握するために、フランジ板厚を実橋梁で使用した板厚の最小値(23mm)と最大値(88mm)の間から選択して、23mm, 30mm, 50mm, 70mm, 88mmとした。

図-3 ひずみゲージの貼付位置 (板幅方向試験体)

そして、Type A と Type B を合わせて計 10 種類の試験体について、それぞれ板幅と板厚方向の残留応力計測用として 2 体を用意し、合計 20 体の試験体を製作した。使用した鋼種と隅肉溶接の脚長、降伏点を表-1 に示す。

溶接条件は、溶接方法が炭酸ガスアーク溶接、溶接電流が 240A、溶接電圧が 32V、溶接速度が 37 cm/min、溶接姿勢が下向き姿勢、使用した溶接材が ϕ 1.2 mm のフラックス入りワイヤ、入熱量が 12500J/min である。

b) 計測方法

本計測で着目するのは、溶接線方向 (試験体長手方向) の残留応力である。残留応力の計測は、機械式切断 (応力解放法) により行った。具体的には、計測位置にゲージ長 1 mm の一般用一軸ひずみゲージを貼り付け、試験体を切断した際に解放されたひずみと逆符号のひずみが試験体に残留していたものとして、これに鋼材のヤング率を乗じて残留応力とする。切断作業は、帯鋸切断機 (図-2) を用いて切断に伴う熱影響を受けないように、非接触温度計で温度計測を行いながら、ひずみゲージの温度補償範囲の最大値 (80 $^{\circ}$ C) を上回ることがないように、十分な配慮をして進めた。

3. フランジ板幅方向の残留応力計測

(1) 計測方法

まず、切断前の試験体にひずみゲージを貼付ける。ゲージの貼付位置を図-3 に示す。次に、各試験体から、溶

図-4 板幅方向試験体の切断順序 (Type A) , 単位 : mm

接線方向に 100mm 幅の試験体を切り出す。切り出す試験体数は Type A が 3 体、Type B が 1 体である。Type A を 3 体とした理由は計測の再現性を確認するためである。その後、図-4 に示すように切断 1 から切断 12 まで、腹板を挟んで交互に試験体の小切りを進める。ただし、Type B では試験体切出し 3 (図-4) の後に、腹板を 110mm の高さに切断する。残留応力の最終的な値は、切断前から各計測位置を小切りにするまでのひずみの変化量から算出した。

(2) 計測結果

図-5 の左列に、フランジ板幅方向の残留応力の計測結果を示す。ここでは、Type A と Type B について、フランジ上下面の計測結果を示している。横軸は計測位置を示し、 ± 400 mm がフランジ端部、0mm がフランジ中央部となる。フランジ端部の値は、ガス切断による熱影響によって板厚方向に均一な残留応力が導入されたものと仮定し、フランジ上下面ともにコバ面中央でのデータとしている。また、フランジ上面のフランジ中央部の値は直接計測することができないため、中央部直近 2 点の計測値を直線で外挿して算出している。

計測結果から、板厚に依らず、フランジ上下面の残留応力分布は、Type A と Type B で差異が小さいことがわかる。また、残留応力分布の全体的な傾向として、フランジ上面ではフランジ端部と溶接部近傍に引張応力、自由突出板の中央部には圧縮応力が分布している。これは、既往の計測結果³⁾と同様の傾向である。

(a) 計測結果 (板厚 23mm)

(b) モデル化 (板厚 23mm)

(c) 計測結果 (板厚 30mm)

(d) モデル化 (板厚 30mm)

(e) 計測結果 (板厚 50mm)

(f) モデル化 (板厚 50mm)

(g) 計測結果 (板厚 70mm)

(h) モデル化 (板厚 70mm)

(i) 計測結果 (板厚 88mm)

(j) モデル化 (板厚 88mm)

図-5 残留応力の計測結果とモデル化 (板幅方向試験体)

図-6 ひずみゲージの貼付位置 (板厚方向試験体)

図-7 板厚方向試験体の作成手順, 単位: mm

フランジ下面については、フランジの板厚が厚くなるにつれて、フランジ中央部の引張応力が圧縮応力に変化している。文献 7) においても、板厚が大きくなると、フランジ中央の残留応力が圧縮になるという傾向が得られている。

(3) 残留応力分布のモデル化

ここでは、第 5 章で実施する有限要素解析での残留応力の導入を容易とするため、計測された残留応力分布のモデル化を行う。

まず、一般に、溶接部の残留応力は熱影響により鋼材の降伏応力に達する³⁾ことから、フランジ上面中央部の値として Type A と Type B の最大値を採用する。次に、板厚が 50mm 以上になると、応力の最小値がフランジ下面の中央部から若干ずれ、分布形が左右対称となっていない。そのため、フランジ下面の中央部で最小値をとるように分布形を修正する。最後に、応力分布の中でも局所的な変化が少ない Type B のフランジ左半分 (計測位置: -400~0mm) のデータを利用して、フランジ中央で左右対称となるように残留応力の分布形を決定する。

図-5 の右列に、上記の手順にもとづいてモデル化した板厚方向の残留応力分布を示す。図中の横軸 $\bar{x}$ と縦軸 σ/σ_y は、それぞれフランジ幅で無次元化した計測位置と降伏点 σ_y で無次元化した残留応力 σ を示す。ここでは、フランジ断面内での応力の自己釣り合いは考慮していない。この理由は、次章で板厚方向の残留応力を計測した後、板厚方向を含む三次元的な応力の自己釣り合

いを考慮するためである。

以上より、板厚が 23mm の場合は板厚方向の残留応力の変化はほとんどないが、板厚が 30mm を超えて厚くなると、板厚方向で残留応力分布が勾配を有することがわかる。このため、フランジ上下面間の残留応力分布形状の同定が課題となる。次章でこれについて検討する。

4. フランジ板厚方向の残留応力計測

(1) 計測方法

板厚方向試験体と同様に、T 形試験体から試験体を切り出すために、まず試験体にひずみゲージを貼付ける。ゲージの貼付位置を図-6 に示す。次に、図-7 に示すように各板厚の試験体から、溶接線方向に 50mm 幅の試験体を Type A と Type B それぞれについて 3 体切り出す。試験体の幅は、文献 9) を参考に決定した。そして、T 形試験体を、1000mm 幅から 250mm 幅へ (切出し 1)、250mm 幅から 150mm 幅へ (切出し 2)、150mm 幅から 50mm へ (切出し 3) と切断して、試験体を切り出す。Type B では、切出し 3 の後、フランジ上面から 110mm の高さで、腹板を切断する。

この後、板厚方向の切断では、2 種類の手法を実施する。1 つ目の手法は、文献 8), 9) を参考にしたものであり、本研究ではこれを「従来の計測手法」と呼ぶ。2 つ目の手法は、計測の簡便さを目的として本研究で提案する手法 (以下、「提案手法」という) である。

図-8 板厚方向試験体の切断手順（従来の手法），単位：mm

図-9 板厚方向試験体の切断手順（提案手法），単位：mm

図-10 板厚方向試験体のゲージ貼付位置（提案手法），単位：mm

従来の計測手法は、板厚方向への切断を繰り返して、新たな面が生成される度に、ひずみゲージを貼付けて計測を実施する。そのため、作業に多大な手間を要する。ゆえに、板厚方向の残留応力分布の計測データが非常に少ない状況にあると考えられる。

本来、板厚内部の残留応力は三次元的に分布しているはずであるが、固有ひずみ法を用いた文献 10)の解析結果によると、溶接残留応力は溶接線方向の成分が最も卓越している。そこで、この残留応力方向が法線方向となる平面で切断した際に、解放される応力が最も大きくなると考え、計測の厳密さや正確さをある程度犠牲にし、計測手法の簡便化を図る。

以下に、本研究で実施したそれぞれの手法について説明する。

a) 従来の計測手法

板厚が 23mm と 88mm の Type A 試験体を対象として、

従来の計測手法を実施した。試験体を幅 50mm で切り出した後、図-8 に示す切断手順を実施する。まず、作業性を向上させるため、溶接止端から 50mm 位置でフランジを切断する（切断 1）。そして、溶接止端から 50mm 位置でフランジを切断する（切断 2）。次に、板厚 23mm と 88mm の試験体をそれぞれ板厚方向に 2 分割と 5 分割するように、フランジ面に沿って鋼板を切り出す（切断 3）。このとき、図-8 中の t は、板厚 23mm と 88mm のそれぞれについて 11.5mm, 17.6mm となる。そして、切り出した鋼板のひずみゲージのきわに、溶接線と直角方向に切り込みを入れる。切り込みの長さは、ゲージの値を逐次確認しながら、その変化がなくなる位置までとした。以降は、新たに生成されたフランジ表面に対してゲージを貼付け、切断 3～切断 5 とゲージ貼付け作業を繰り返す。

図-11 残留応力の計測結果(板厚方向試験体; Type A), 赤四角: ひずみゲージの貼付位置

図-12 残留応力の計測結果(板厚方向試験体; Type B), 赤四角: ひずみゲージの貼付位置

図-13 計測手法の違いによる計測結果の比較

b) 提案手法

図-9 と以下に, 提案する計測手法の手順を説明する.

- ゲージ貼付け 1: 図-8 と同様に, T 形試験体から 50mm 幅の試験体を切り出した後, 腹板とフランジ下面中央部にひずみゲージを貼付ける. それらの貼付け間隔を図-10 に示す.
- 切断 1: 溶接線方向と平行となる平面での切断は, 溶接線方向の残留応力に対して大きな影響を与えない. つまり, 最大の応力解放量とはならないと仮定し, 溶接脚端部で鉛直方向にフランジを切断する.

なお, この仮定を仮定 1 と呼ぶ.

- ゲージ貼付け 2: フランジの切断面にひずみゲージを貼付ける. ひずみゲージは, フランジ上下面から 3mm の位置に 1 枚ずつ, これより内部には 8mm 程度の等間隔で貼付ける.
- 切断 2: 切断作業を効率化させるため, もう片側のフランジも溶接脚端部で鉛直方向に切断する.
- 切断 3~切断 4: ひずみゲージのきわを溶接線方向に垂直となる平面で切断する. ここで, 溶接線方向の残留応力が最も解放されると仮定する. なお, こ

図-14 提案手法の計測結果の再現性 (板厚方向試験体)

の仮定を仮定 2 と呼ぶ。

- ・ 切断 5～切断 8：最後に、試験体の小切りを行う。

次節では、提案手法による各切断イベントのデータを分析し、上記手順の仮定 1 と仮定 2 の検証を行う。また、提案手法と従来手法により計測された残留応力を比較し、提案手法の妥当性を検討する。

(2) 計測結果

a) 各切断イベントの計測結果

提案手法による計測結果を図-11 と図-12 に示す。図-9 の切断 5 以降は、応力の変化が小さかったため図示を省略した。また、腹板とフランジでは計測位置が異なるため、これらを分けて表示し、ひずみゲージの貼付位置を赤い四角で示している。フランジ上下面の値は、直近 2 点の計測値から直線外挿して求めている。

図-11 と図-12 から、溶接線方向に垂直となる平面で

切断する切断 3 と切断 4 で、溶接線方向の残留応力が最も解放されており、仮定 2 が妥当であることがわかる。また、溶接線方向と平行となる平面での切断では応力の解放量は小さいことから、仮定 1 の妥当性が確認される。従って、提案手法は、前節の仮定を満たす手法であると言える。

また、腹板高さの異なる Type A と Type B の計測結果を比較すると、Type A では腹板上端をガス切断していることに起因して、ここに引張残留応力が導入されていることが分かる。

b) 計測手法の比較

板厚が 23mm と 88mm の Type A 試験体を対象として、図-13 に、両者の計測結果の比較を示す。なお、提案手法では、フランジ上面に溶接ビードが位置するため、ひずみゲージを貼付けることができなかった。そのため、図中ではその部分を付近 2 点のデータで直線外挿して点

図-15 試験体作成時に解放された残留応力

(青線：切出し1；赤線：切出し2；緑線：切出し3；黒線：1000mm幅から100mm幅)

線で示している。また、フランジ下面についても同様に図示した。

二つの計測手法を比較すると、計測点数や計測手順が異なることから計測結果に相違がみられるものの、全体の傾向は概ね一致していることが分かる。

c) 計測結果の再現性

図-14 に、提案手法により計測された各板厚の板厚方向残留応力計測結果を Type A と Type B について示す。図中では、フランジの分布のみを示している。板厚 30mm の試験体を除いて、Type A と Type B ともに残留応力分布が概ね一致していることが分かる。板厚 30 mm の試験体で差異が見られる原因としては、溶接熱量や切断速度などによる影響が考えられるが、明確ではない。

ここで、溶接部近傍に導入される残留応力は降伏点近

くに達するものと考えられるが、計測された溶接部での残留応力は降伏点よりも小さくなった。これは、大型の T 形試験体からフランジ幅 50mm の試験体を切り出す際に、残留応力の一部が解放されたためである。このため、この分の残留応力を考慮して、図-14 の計測結果を補正することとする。

次節では、試験体を切り出す際に解放された残留応力を分析して、計測結果の補正を行う。次に、FEA において残留応力の導入を容易にするために、三次元的な応力の自己釣り合いを考慮した後、残留応力分布のモデル化を行う。

図-16 板厚方向残留応力分布の補正結果

(3) 残留応力分布のモデル化

a) 応力分布の補正方法

T 形試験体から残留応力計測用試験体を切り出す際に解放された残留応力を Type A の幅方向試験体について分析する。ここで、幅方向試験体とする理由は、図-3 に示すように、試験体を切出す前に腹板近傍の 2 点にひずみゲージを貼付けており、板厚方向の計測でゲージを貼り付けた溶接脚端部の値を近傍の計測点から直線外挿して得ることができるためである。

図-4 をもとに、T 形試験体から残留応力計測用試験体を切り出す手順を以下に示す。

- ・ 切出し 1 : 溶接線方向に 1000mm 幅の T 形試験体から 250mm 幅の試験体を切り出す。
- ・ 切出し 2 : 250mm 幅の試験体から片側 75mm を切断し、175mm 幅の試験体とする。
- ・ 切出し 3 : 175mm 幅の試験体のもう一方の片側

表-2 フランジ上下面の残留応力の比較

板厚 (mm)	σ / σ_y			
	残留応力モデル (図-5)		計測結果 (図-16)	
	上面	下面	上面	下面
23	0.63	0.35	0.70	0.34
30	0.57	0.04	0.74	0.07
50	0.67	-0.18	0.79	-0.02
70	0.73	-0.22	0.96	-0.27
88	0.74	-0.31	0.88	-0.20

75mm を切断し、最終的に 100mm 幅の試験体とする。これらの各切断に応じたフランジ中央部の溶接線方向残留応力の変化を図-15 に示す。各切断過程で、フランジ上下面では、概ね同程度の残留応力が解放されていることがわかる。このため、本研究では計測点数が限られ

(a) 板厚 23mm

(b) 板厚 30mm

(c) 板厚 50mm

(d) 板厚 70mm

(e) 板厚 88mm

図-17 極厚鋼板の残留応力のモデル化

ることから、残留応力用試験体を作成するときに、図-15の黒色で示す直線状に残留応力が解放されたものと仮定し、図-14の計測結果を補正することにする。

上記の手順で、図-14を補正した結果を図-16に示す。図中の横軸は、残留応力 σ を降伏点 σ_y で無次元化した値、縦軸 $\bar{z}$ は計測位置を板厚で無次元化した値である。また、図内の点線が図-15から得られる応力の補正量を表す。補正前の結果は、図-14の平均値である。フランジ上下面の値は、近傍の2点を直線外挿して算出している。ここで、図-16と図-5右列の点線位置におけるフランジ上下面の値を整理すると表-2となる。両者は、フランジ上面でやや差があるものの、3章での残留応力のモデル化による誤差も考慮して許容できるものと考ええる。

残留応力分布形をモデル化して有限要素解析で使用する際には、できる限り単純化された分布形の方が望ましい。このため、図-16をふまえ、図-5の板幅方向の残留応力を板厚方向に補間する形状関数として、板厚23mmでは一定値、それ以外の板厚では直線とする。これは、本研究での計測結果と文献7)の結果から、板厚が30mmを越えるとフランジ下面の残留応力分布に変化が生じると判断したためである。さらに、文献10)では固有ひずみ法による解析結果から得られた板厚方向の溶接残留応力分布も概ね直線となっていることが示されているため、この形状関数は妥当と考える。

b) 三次元的な応力の自己釣り合い

前項でフランジ断面内の残留応力分布が決定されたので、断面内での応力の自己釣り合いを三次元的に考慮し、残留応力分布の最終的なモデル化を行う。釣り合いを考える際に、板幅方向の圧縮応力の領域幅をパラメータとする。

図-17に各板厚に対する残留応力分布モデルを示す。左図の黒色の実線が、モデル化された残留応力分布を表す。右図は、残留応力分布を三次元的に表現したものであり、 $\bar{z}$ は板厚で無次元化した板厚方向の計測位置である。

板厚23mmの場合は、板厚方向の残留応力分布を一定とし、二次元的な応力の釣り合い³⁾を考えた。この結果、得られた残留応力分布を図-17(a)に示す。図-17(a)の右図を $\bar{z}=0$ に正射影したものが左図となっている。

板厚23mm以外の場合は、板厚方向の残留応力分布は直線的に変化するとした。このとき、三次元的に応力の釣り合いを考える必要がある。図-17の左図に示すように、 $\bar{z}=1$ の平面と $\bar{z}=0$ の平面で、それぞれ青線と赤線で表される線上の点を $\bar{z}$ 方向に結ぶ直線が、 $-0.5 \leq x \leq 0.5$ の範囲で移動する。この直線が描く曲面と $\bar{z}=1$ の平面、 $\bar{z}=0$ の平面、 $\sigma/\sigma_y=0$ の平面によって囲まれる体積が0となるように、圧縮領域の幅を決定する。ここで、板幅方向の分布は左右対称としているので、

$x \geq 0$ の範囲のみで考えれば良い。この体積を計算する時に本研究で導出した公式を付録に記す。

以上より、23mm以外の板厚について得られたモデル化された残留応力分布を図-17(b)~(e)に示す。また、分布の特徴点を付録の表-A1にまとめる。これらの残留応力分布を次章の弾塑性有限要素解析で鋼I桁モデルのフランジに導入することとする。

5. 極厚鋼板の溶接残留応力が鋼桁の終局曲げ耐力に与える影響

本章では実橋梁の中間支点部を対象とし、極厚鋼板の溶接残留応力が終局曲げ耐力に与える影響を弾塑性有限要素解析により検討する。残留応力については、4章の実測結果をもとに、三次元的な応力の釣り合いを考慮してモデル化した分布形状を導入する。

(1) 解析モデルおよび解析概要

実橋梁の中間支点部を参考にして、図-18に示す解析モデルを作成した。解析対象を中間支点部とした理由は、下フランジに最大板厚となる板厚88mmの厚板が使用されているためである。また、解析モデルの垂直補剛材の板厚を50mmとしており、実橋で使用されている板厚(30mm)よりも厚くしている。これは、解析における局部座屈の影響を避けるためである。さらに、実橋梁では、腹板と補剛材、補剛材とフランジは開先溶接されていることから、解析モデルでも溶接部の節点を剛結させることで開先溶接を再現することとした。

表-3にモデルの断面寸法および材料特性を示す。解析モデルの終局状態は曲げ降伏となり、降伏モーメント M_y ならびに全塑性モーメント M_p はそれぞれ60,370 kN m, 80,264 kN mである。

解析ソフトはDiana 9.4.2を使用し、要素は20節点2次ソリッド要素(CHX60)を用いる。モデルの対称条件を考え、1/2モデルとする。部材断面の要素分割は、上フランジ幅方向に20分割、下フランジ幅方向に22分割、腹板高さ方向に16分割、板厚方向に2分割を基本とする。桁長さ方向に57分割としたが、応力変化の大きい載荷点付近および桁端部は更に細かく分割した。また、残留応力分布変化のところには、必ず節点を設けるようにした。モデルの節点数と要素数は、それぞれ42,017と7,552となった。

鋼材の応力-ひずみ関係は完全弾塑性体のバイリニアモデルとする。ヤング率を200GPa、ポアソン比を0.3とする。なお、載荷板を模擬した鋼板は弾性体としている。ただし、本研究では、残留応力による影響を評価するため、初期たわみを考慮していない。

図-18 解析モデル, 単位: mm

表-3 断面寸法および材料特性

部材	寸法	鋼種規格	降伏点 (MPa)
上フランジ	750mm×50mm	SM520C-H	355
腹板	31mm×2950mm	SM490YB	355
下フランジ	850mm×88mm	SM520C-H	355
補剛材	50mm	SM570	450

図-19 腹板の残留応力分布形状³⁾

図-20 荷重-変位関係曲線

(NR: 残留応力なし, AC: 残留応力あり)

図-21 応力コンター図(ミーゼス応力), 単位: MPa

解析ケースは、以下に示す2ケースとする。

- ・モデルNR：残留応力分布を考慮しないケース
- ・モデルAC：残留応力分布を考慮するケース

上下フランジには、図-17(c)と(e)に示す板厚 50mm と 88mm の実測結果からモデル化された残留応力の分布形を導入する。上下フランジの最大引張残留応力は、それぞれ降伏点の 0.80 と 0.94 倍となっている。腹板には、図-19 に示す台形状の残留応力分布³⁾を仮定する。図中の σ_{ny} は、腹板の降伏応力である。解析では、これらの残留応力を各節点へ初期応力として導入して、自己釣り合いを考慮する。その後、図-18 に示すように、桁中央部に均一な変位 δ を変位制御で与える。

(2) 解析結果

図-20 に各ケースの曲げモーメントー変位関係曲線を示す。縦軸のモーメント M は桁中央の曲げモーメントであり、支点反力の合計から載荷荷重を求めて算出した。横軸の δ は図-18 に示す D 点における載荷方向の変位である。降伏モーメント M_y と全塑性モーメント M_p も同図に示す。モデル NR の終局耐力は M_p となっていることから、解析モデルならびに解析手法は妥当と言える。

モデル AC の降伏耐力は、モデル NR と比較すると、0.32%低下している。これは、残留応力の導入により、モデル AC がモデル NR より早い段階で降伏して剛性が低下したためである。しかし、その低下は僅かであり、残留応力の有無に関わらず、全塑性耐力 M_p に達した後は、モーメント M が低下せずに変形が進行している。以上より、終局曲げ耐力に対して残留応力分布が与える影響は小さいと言える。

モデル NR とモデル AC について、降伏モーメント M_y 達するときのミーゼス応力コンター図を図-21 に示す。また、表-4 に M_y および M_p に達するときの荷重方向の変位 δ_y および δ_p をまとめる。表-4 から、残留応力を考慮する場合、剛性が低下することから、 δ_y および δ_p が、若干大きくなるものの、その差異は小さいことがわかる。

6. まとめ

現在、少数I桁橋梁などの合理化設計を背景として、板厚が50mm以上の極厚鋼板を使用した鋼I桁橋が多く建設されている。ここでは、厚板の残留応力が鋼I桁の耐荷力に影響を与えることが懸念されるものの、実測データが乏しく、過去のデータにもとづいた耐荷力曲線が使用されている。本研究では、フランジと腹板の溶接部を模擬したT形試験体を製作して、板幅方向と板厚方向の溶接残留応力の計測を行った。これらの結果をもとに、溶接残留応力が鋼I桁の終局曲げ耐力に与える影響の基

表-4 鉛直方向変位の比較

モデル	δ_y (mm)	δ_p (mm)
NR	16.965	32.962
AC	17.367	36.706

礎検討を弾塑性有限要素法を用いて解析的に行うこととした。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) T形試験体の腹板高さが溶接残留応力分布に与える影響は、フランジと比較して相対的に板厚が薄い腹板で大きいものの、フランジの応力分布に与える影響は小さい。
- (2) フランジ板幅方向の残留応力計測では、フランジの板厚が厚くなるにつれて、溶接部近傍のフランジ上下面の計測結果に相違が見られた。この差異は、板厚30mmから生じ、板厚が50mm以上になると、フランジ下面の残留応力は圧縮応力となった。これは、フランジの板厚が厚くなると、溶接残留応力が板厚方向に分布することを意味する。
- (3) フランジ板厚方向の残留応力計測では、機械式切断により解放される残留応力は溶接線方向が法線となる平面で切断された際に最も大きくなると仮定し、文献9)の計測手法よりも作業性を効率化した計測手法を提案した。計測結果から仮定の妥当性が検証され、計測手法の比較から、両者の傾向が概ね一致することが確認された。
- (4) T形試験体から板厚方向の残留応力計測用試験体を切り出す際に、残留応力の一部が解放されることを確認した。このため、試験体切出し時に解放された応力値を用いて計測結果を補正する方法を示した。
- (5) 極厚鋼板を使用したフランジの溶接残留応力分布を、実測結果にもとづき、板幅と板厚方向の三次元的な応力の自己釣り合いを考慮して決定した。
- (6) 決定された残留応力分布を、実橋梁の中間支点部を模擬した有限要素モデルに導入し、厚板の残留応力分布が鋼I桁の終局曲げ耐力に与える影響について検討した。その結果、本研究の解析モデルでは、残留応力分布が終局曲げ耐力に与える影響は小さいことが確認された。しかし、検討したケースが1ケースのみであることから、今後さらなるデータの蓄積が必要である。

謝辞：本研究の一部は、(社)日本鉄鋼連盟「鋼構造研究・教育助成事業」の研究助成金で実施しました。また、残留応力の計測では本学学生諸子の協力を受けました。ここに記して謝意を表します。

図-A1 $\bar{z}=0$ への正射影

図-A2 $\bar{x}=\bar{x}$ の切断面

表-A1 図-17 でモデル化された残留応力分布の特徴点

(a) 板厚 23mm

$\bar{x}$	σ / σ_y	
	上面	下面
-0.50	0.40	0.40
-0.43	-0.10	-0.10
-0.07	-0.10	-0.10
0.00	0.74	0.74
0.07	-0.10	-0.10
0.43	-0.10	-0.10
0.50	0.40	0.40

(b) 板厚 30mm

$\bar{x}$	σ / σ_y	
	上面	下面
-0.50	0.37	0.37
-0.44	-0.09	-0.03
-0.26	-0.07	-0.04
-0.16	-0.06	-0.06
-0.11	-0.01	-0.10
-0.06	0.15	-0.12
-0.03	0.36	-0.11
0.00	0.66	0.10
0.03	0.36	-0.11
0.06	0.15	-0.12
0.11	-0.01	-0.10
0.16	-0.06	-0.06
0.26	-0.07	-0.04
0.44	-0.09	-0.03
0.50	0.37	0.37

(c) 板厚 50mm

$\bar{x}$	σ / σ_y	
	上面	下面
-0.50	0.62	0.62
-0.46	-0.11	-0.01
-0.16	-0.11	-0.01
-0.11	-0.04	-0.04
-0.06	0.13	-0.09
0.00	0.80	-0.20
0.06	0.13	-0.09
0.11	-0.04	-0.04
0.16	-0.11	-0.01
0.46	-0.11	-0.01
0.50	0.62	0.62

(d) 板厚 70mm

$\bar{x}$	σ / σ_y	
	上面	下面
-0.50	0.64	0.64
-0.41	-0.10	-0.10
-0.11	-0.10	-0.10
-0.06	0.05	-0.13
0.00	0.97	-0.23
0.06	0.05	-0.13
0.11	-0.10	-0.10
0.41	-0.10	-0.10
0.50	0.64	0.64

(e) 板厚 88mm

$\bar{x}$	σ / σ_y	
	上面	下面
-0.50	0.77	0.77
-0.38	-0.04	-0.25
-0.11	-0.04	-0.25
-0.06	0.17	-0.25
0.00	0.94	-0.32
0.06	0.17	-0.25
0.11	-0.04	-0.25
0.38	-0.04	-0.25
0.50	0.77	0.77

付録

ここに、第4章で取り扱った三次元的な応力の自己釣

合いを考慮する際に導出した公式を記す。図-A1に示すように、 $\bar{z}=1$ の平面と $\bar{z}=0$ の平面で、それぞれ $\bar{\sigma}^+$ と $\bar{\sigma}^-$ で表される直線上の点を $\bar{z}$ 方向に結ぶ直線が、

$\bar{x}_1 \leq \bar{x} \leq \bar{x}_2$ の範囲で移動する. この直線が描く曲面と $\bar{z}=1$ の平面, $\bar{z}=0$ の平面, $\sigma/\sigma_y=0$ の平面によって囲まれる体積を求める.

図-A1における直線 $\bar{\sigma}^+$ と $\bar{\sigma}^-$ は次のように表される.

$$\bar{\sigma}^+ = a^+ \bar{x} + b^+ \quad (1a)$$

$$\bar{\sigma}^- = a^- \bar{x} + b^- \quad (1b)$$

ただし,

$$a^+ = \frac{\bar{\sigma}_2^+ - \bar{\sigma}_1^+}{\bar{x}_2 - \bar{x}_1} \quad (2a)$$

$$b^+ = \bar{\sigma}_2^+ - a^+ \bar{x}_2 \quad (2b)$$

$$a^- = \frac{\bar{\sigma}_2^- - \bar{\sigma}_1^-}{\bar{x}_2 - \bar{x}_1} \quad (2c)$$

$$b^- = \bar{\sigma}_2^- - a^- \bar{x}_2 \quad (2d)$$

である.

次に, 対象とする立体を $\bar{x} = \bar{x}$ の平面で切断した図を図-A2に示す. ここで灰色の部分が対象とする立体の切断面となる. ここで, 求める体積は,

$$V = \int_{\bar{x}_1}^{\bar{x}_2} \left(\int_0^1 \bar{\sigma} d\bar{z} \right) d\bar{x} \quad (3)$$

と表される. また, 図-A2の直線 $\bar{\sigma}$ は,

$$\bar{\sigma} = \left(\bar{\sigma}^+ - \bar{\sigma}^- \right) \bar{z} + \bar{\sigma}^- \quad (4)$$

と表される. よって式(4)を式(3)に代入して整理すると, 求める体積は, 次のようになる.

$$V = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2} (a^+ + a^-) (\bar{x}_2^2 - \bar{x}_1^2) + (b^+ + b^-) (\bar{x}_2 - \bar{x}_1) \right\} \quad (5)$$

この式から, 図-17の直線ごとに区分的に体積を求め, 全体の体積 V を0とするように, 圧縮領域の幅を求める.

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書(I 共通編, II 鋼橋編)・同解説, 日本道路協会, 2002.
- 2) 中井博, 北田俊行：鋼橋設計の基礎, 共立出版, 1992.
- 3) 鋼構造委員会：座屈設計ガイドライン, 改訂第2版, 土木学会, 2005.
- 4) 藤井堅, 三木千壽, 寺田宏幸, 田中和成, 有尾一郎：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, Vo.44A, pp.103-114, 1998.
- 5) 熊野拓志, 鈴木康夫, 北原武嗣, 杉浦邦征, 山口隆司：テーバー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, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.977-984, 2009.
- 6) 藤井堅, 石川晋介, 中茂泰則, 田中雅人：極厚鋼板の材料特性と残留応力およびその静的強度への影響, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.253-263, 2010.
- 7) 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.
- 8) Miki, C., Onishi, R., Kubota, T. and Hanji, T.: Radiation characteristics of ultrasonic tip echo and its application to detect fatigue crack closure in welding residual stress fields, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 2, pp.219-228, 2010.
- 9) 三木千壽, 穴見健吾, 谷英樹, 杉本一朗：溶接止端部改良による疲労強度向上法, 溶接学会論文集, 第17巻, 第1号, pp.111-119, 1999.
- 10) 上田幸雄, 麻寧緒, 王雅生, 古木良一：単層および多層すみ肉溶接残留応力の測定, 溶接学会論文集, 第13巻, 第3号, pp.470-478, 1995.

(2011.8.2 受付)

MEASUREMENT METHOD FOR WELDING RESIDUAL STRESS IN STEEL I-SHAPED GIRDER WITH THICK FLANGE AND ITS INFLUENCE ON LOAD CARRYING CAPACITY FOR BENDING

Takeshi MIYASHITA, Naofumi INABA, Shigeyuki HIRAYAMA, Cuiping LIU and Masatsugu NAGAI

Recently, the construction number of steel girder bridge using thick plates has been increasing. It is afraid that residual stress in the thick plates affects the load carrying capacity of the girder. Therefore, this study aims to measure the distribution of residual stresses in the thick plates by mechanical cutting method. Herein, simplified measurement method is proposed for the measurement in the thickness direction. As a result, it was found that the slope of stress distribution in the thickness direction becomes large as the thickness of the plate increases. Then, after considering the equilibriums of residual stress three-dimensionally, the residual stress was introduced into a finite element analysis model, which is the modeling of an existing bridge at the intermediate support. It was confirmed that residual stress in the thick plate does not affect the load carrying capacity of steel girder in bending.