

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

MATERIAL PROPERTIES AND RESIDUAL STRESSES IN STAINLESS STEEL-STEEL CLADDING

藤井堅*, 三木千寿**, 寺田宏行***, 田中和成***, 有尾一郎****

Katashi FUJII, Chitoshi MIKI, Hiroyuki TERADA, Kazunari TANAKA and Ichiro ARIO

* 工博 広島大学助教授 工学部第四類 (〒739 東広島市鏡山1-4-1)

** 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

*** 工修 中外テクノス(株) 工業システム事業部 (〒733 広島市西区山手町17-3)

**** 工博 広島大学助手 工学部第四類 (〒739 東広島市鏡山1-4-1)

Material properties and residual stresses of stainless clad steel were experimentally investigated. For the residual stresses, the distributions in the direction of the thickness were obtained by chipping method. Then an analytical attempt was performed in order to clarify the producing mechanism of the residual stresses through the procedure of the production. In the analysis, the finite element method was used for heat conduction and thermal stress analysis which show the cooling process, and for elasto-plastic analysis which shows straightening by roller after cooling. Results show that the residual stress in the stainless clad steel would be able to be almost predicted analytically.

Key Words: stainless-clad steel, residual stress, experiment, numerical simulation

1. まえがき

インフラストラクチャーの将来的あり方の一つとして、メンテナンスコストミニマム化が強く要求されている。鋼橋における防食対策は専ら塗装に頼ってきたが、供用期間中に実施される塗装塗り替え費用は必ずしも少額とはいえない。したがって、塗装塗り替え作業の低減あるいは不要化は、鋼橋の今後進むべき一つの方向といえる。

塗装に頼らない防食性向上策の一つとして、ステンレスクラッド鋼の橋梁への適用が考えられる。この概念の下、実物大モデルによる製作・施工上の諸問題の抽出と対策の検討や腐食促進試験¹⁾、疲労強度実験²⁾が行われ、ステンレスクラッド鋼を橋梁材料として使用することは十分可能であることが確認された。しかし、材料特性や残留応力などの設計のための基礎資料は十分には整っていないのが現状である。

そこで本研究では、ステンレスクラッド鋼板の材料特性と板厚方向の残留応力分布について実験的に調べる。さらに、この残留応力発生過程の数値シミュレーションを行って、その発生メカニズムの解明を試みる。

ステンレスクラッド鋼の残留応力は、X線法、穴開け法や逐次除去法により測定されている。しかし、測定例はわずかしかない³⁻⁴⁾。また、残留応力の測定結果自体ばらつきが大きく、加えてその分布形状も製作方法やクラッド

比、あるいは使用材料などに大きく依存しているようである。したがって、今後、より多くの測定結果の蓄積が必要といえる。

溶接による残留応力は、耐荷力に大きく影響することは周知の事実であり、多くの実測結果や、その耐力に及ぼす敏感度などが統計的に検討されている⁵⁾。また、この種の残留応力の解析シミュレーションも試みられているようであるが、実際の残留応力の解析的把握は難しいようである。一方、クラッド鋼の残留応力については、発生過程を追跡した解析シミュレーションに関する研究報告は見当たらない。

2. 製作方法の概要

本研究で扱うステンレスクラッド鋼は、わが国の製鉄会社3社によって製造され、全て圧延法により製作されたものである。ステンレスクラッド鋼の製作方法⁷⁾には、圧延、爆着、溶融があるが、現在では圧延法が最も一般的となっている。ステンレスクラッド鋼の残留応力はその製作過程に大きく依存するので、以下に圧延製作過程を簡単に述べる。

圧延ステンレスクラッド鋼の製造法は、各社それぞれ独自の技術があり、全く同じというわけではないが、概ね次のような工程である。

まず、ステンレスと鋼それぞれ単独にスラブ（厚板）を作成し、次に真空室内で両者の端面を溶接してスラブを組立てる。この各スラブの板厚により最終的なクラッド比（ステンレス板厚と全板厚の比）が決定される。次に、ステンレスと鋼を一体としたスラブを熱間圧延し所定の板厚に仕上げる。このとき、鋼とステンレスの境界面は金属組織的に結合する。また、結合性を高めるためにニッケルを界面に挿入する場合もある。

冷却後は、ステンレスと鋼の線膨張率の違いからステンレス側が凹となるような面外変形を生じるので、これを矯正して平面とし、ステンレスの表面仕上げ後出荷される。なお、冷却途中で熱処理を行う場合もある。

ステンレスと鋼を一体としたスラブの熱間圧延工程において、一枚の一体化スラブを圧延する場合（ここでは一枚圧延と呼ぶ）と、スラブ2枚をステンレス側を内側にして合わせ、界面に剥離材を挟んで、2枚のクラッド鋼板を同時に圧延する場合（2枚圧延と呼ぶ）がある。2枚圧延は板厚の薄いクラッド鋼板製作に適用され、厚板の場合は一枚圧延が用いられるようである。このとき、圧延後の冷却過程における熱伝導境界条件が両者で異なる。すなわち、一枚圧延では両表面からの熱伝達冷却であり、2枚圧延では、鋼表面からのみの熱伝達冷却と考えられる。

ところで、一般にステンレス鋼の耐食性はクロムによって保持されている。オーステナイト系ステンレス鋼を450～850℃の温度で長時間加熱しゆっくりと冷却すると鋼中の炭素がクロムと結合し、クロム炭化物として結晶粒界に析出するため粒界近傍にクロム欠乏層が形成され、粒界腐食が起こりやすくなる。これを防止するために、高温でこの炭化物を鋼中に固溶させ、直ちに急冷することで析出を防止し、耐食性を確保する熱処理（固溶化熱処理）が行われる。このときステンレス再結晶による内部ひずみの緩和が生じて軟化が起こる。ステンレス単一材では、普通、固

溶化処理が施されるが、ステンレスクラッド鋼では母材（普通鋼）の材料特性を損なう危険性があるために、固溶化熱処理を行わないで、熱間圧延のままで供給されるのが一般的である。このため合わせ材（ステンレス）は、組織が再結晶せず、圧延により微細化したままであるため高強度となる。なお、圧延のままのステンレスクラッド鋼では、粒間腐食に対して若干劣ると考えられるが、橋梁への適用においては実用上の問題はないと思われる。また、今回の合わせ材のように、低炭素量ステンレス（SUS316L）を用いることにより、さらにその危険性を低減できる。

3. 材料特性

3.1 使用材料

使用したステンレスクラッド鋼は、母材：SS400、合せ材：SUS316Lで、合せ材厚は2mmの一定値、母材厚はそれぞれ4, 7, 13, 18mmと変化させた計4種類の2層圧延クラッド鋼である。また、全てのクラッド鋼は圧延のままで、固溶化処理は行っていない。

3.2 引張試験

クラッド鋼試験片（25本）のみならず、合せ材を切削除去して母材のみ残した試験片（26本）と母材を除去して合せ材のみ残した試験片（27本）の3種類、合計78本に対して引張試験を行った。载荷は、25tオートグラフにより、载荷速度0.3mm/minの変位制御漸増载荷を用いた。試験片はJIS 5号とし、圧延方向と圧延直角方向にそれぞれ2本ずつ切り出した。

ステンレスあるいは一部の軟鋼については、降伏点が明確に現れなかったため、0.2%オフセット法により降伏応力を求めた。

a) 応力-ひずみ曲線

図-1に、板厚9mmのクラッド鋼から作成した母材、合わせ材、クラッド鋼について、それぞれの応力-ひずみ曲線の一例を示す。なお、クラッド鋼の応力は軸力を全断面積で除した値とした。また、図には、ステンレスおよび鋼をそれぞれ完全弾塑性体と仮定し、複合体としてのクラッドの応力-ひずみ関係を求めた解析結果もあわせて示す。

図-1からわかるように、ステンレスは降伏棚が明確でなくround house型曲線を呈す。また、軟鋼では、図-1では降伏棚が明瞭であるが、はっきりとした降伏棚がみられないものもあった。クラッド鋼は、クラッド比が小さい場合には軟鋼の影響が強く現れるので、板厚20mmのようにクラッド比の小さいものは、クラッド鋼の応力-ひずみ曲線にも降伏棚が現れる場合もあった。

両材料を完全弾塑性材料とした場合のクラッド鋼の応力-ひずみ関係は、図-1に示すように、3本の直線で構成される。クラッドの解析結果と実験結果を比較すると、両者は概ね一致しており、両材料を完全弾塑性体と仮定してよいと判断できる。また、図では、ステンレスの降伏応力（0.2%オフセット耐力で、点線）は、軟鋼

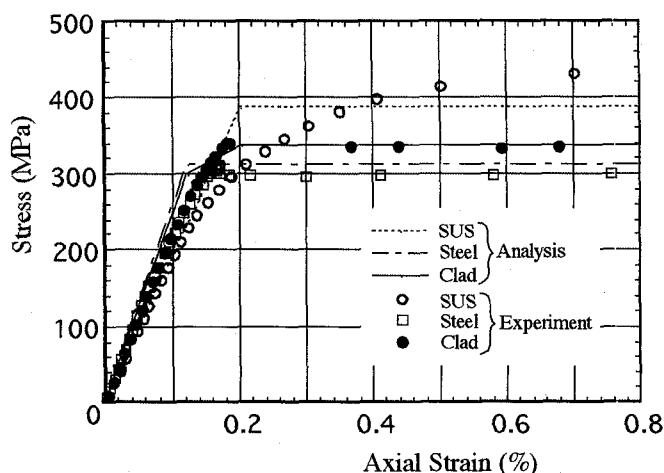


図-1 応力-ひずみ曲線
t=9mm(SUS:2,Steel:7)

のそれ(一点鎖線)よりも大きく、引張力の増加につれ、まず軟鋼が降伏し、その後ステンレスが降伏しているのがわかる。

b) 材料特性

圧延方向および圧延直角方向の材料特性を図-2に示す。図-2から、弾性係数、降伏応力および引張強度ともに圧延方向による影響はほとんどないことがわかる。したがって、以下の平均操作は、両者を区別しないで行った。

図-3に、今回の引張試験で得られた材料特性値(実測結果)と板厚の関係を示す。ここで注意すべきことは、合わせ材厚を2mmと一定にしているため、板厚が大きくなるとクラッド比が小さくなり、鋼の影響が強くなることである。したがって、図-3に示すように、板厚の増加とともにクラッド鋼の材料特性値は鋼のそれに近づくことになる。また、図-3から、ステンレスについては弾性係数、降伏応力、引張強度ともにばらつきがかなり大きく、板厚変化との相関はみられない。一方、軟鋼の降伏応力については板厚の増加とともに小さくなる傾向が認められる。これは一般の単一鋼の現象と共通する。

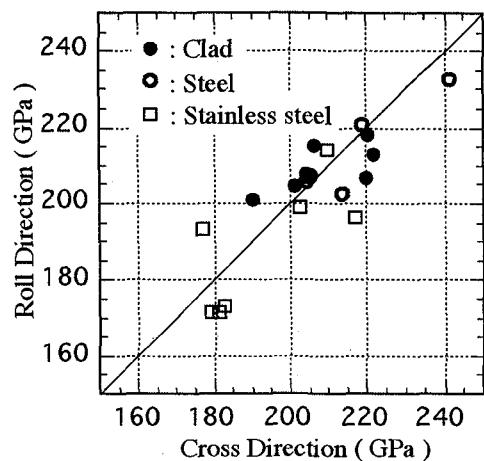
資料を提供していただいたA~C社のステンレスクラッド鋼について、引張試験を行って得られた材料特性値(実測値)を表-1に示す。表中のA~Cは、各社ごとの平均、また、全体は3社全体の平均値である。

図-3および表-1で特徴的なことは、降伏応力および引張強度と、破断伸びであろう。まず、合わせ材SUS316Lについて、降伏応力、引張強度の公称値はそれぞれ265MPa、550MPaである⁸⁾が、実測値は公称値に比べかなり大きい。一方、SS400の実測値については、降伏点(公称値235MPa)、引張強度(公称値400MPa)ともにステンレスに比べると公称値に近い。次に、破断伸びについては、単一鋼で得られる一般的値(鋼20~30%、SUS50~60%程度)に比べて、数割低下している。これは、先に述べたように圧延のまま出荷されること、また、クラッド鋼の熱処理過程が軟鋼の固溶化温度とほぼ同じ温度で処理されること、ステンレスの板厚が薄く圧延されること、などに起因すると考えられる。表-1で、製造会社間で材料特性にかなり差があるが、これは各社の製造工程、熱処理温度などの違いと考えられる。なお、B社の材料は単一材の材料特性に最も近い結果となっているが、他の2社と異なるのは界面にニッケルインサートがあることである。これがニッケルインサートによるものかどうかについては、とくにB社の実験データが今回は少なく、さらに実験データを追加する必要がある。

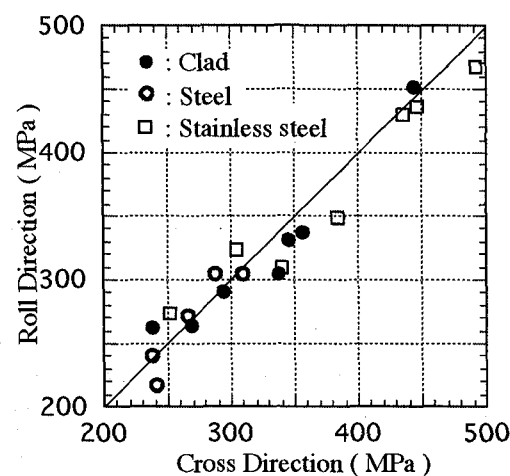
これらの図表は、クラッド鋼を橋梁に使用する場合は実設計においては、クラッド鋼の材料特性値に各単一材料の公称値を用いるのは適当でないことを示している。

c) クラッド鋼の材料特性の評価

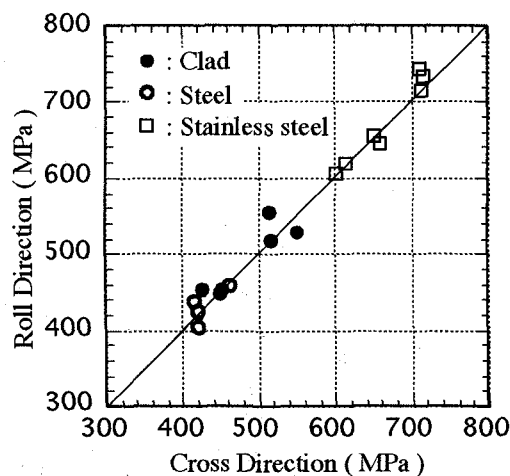
熱間圧延により製造されたステンレスクラッド鋼の降伏点(σ_y)、引張強さ(σ_B)、弾性係数(E_0)は、母材と合せ材個々の材料特性および板厚構成により、それぞれ次式で



a) Elastic Modulus



b) Yielding Stress



c) Tensile Strength

図-2 ロール方向とロール直角方向の材料特性

近似できるとしている⁹⁾。

$$\sigma_y = \frac{(t_b \sigma_{yb} + t_c \sigma_{yc})}{t_b + t_c}, \quad (1)$$

$$\sigma_B = \frac{(t_b \sigma_{Bb} + t_c \sigma_{Bc})}{t_b + t_c}, \quad (2)$$

$$E_0 = \frac{(t_b E_{0b} + t_c E_{0c})}{t_b + t_c}. \quad (3)$$

ここに、 t は板厚、また添字 b, c はそれぞれ母材、合せ材を示す。

クラッド鋼から削り出されたステンレスおよび鋼の引張試験で得られた実測値を式 (1) ~ (3) に代入して得られた結果と、クラッド鋼試験片の実験結果を比較して図-4に示す。図中、 μ は (実験値/計算値) の平均であり、 σ は標準偏差である。これらの図から、クラッド鋼の材料定数は式 (1) ~ (3) で評価してよいといえる。

3.3 板曲げ試験

曲げ試験は、12本の試験片 (板幅20~25mm) の表曲げおよび裏曲げ試験を実施した。载荷は2点支持2点载荷

である。

実験から得られた中立面の位置は、図-3あるいは表-1に示すようにステンレスと鋼の弾性係数の差が小さいこともあって、中立面は板の中央面と大差なかった。さらに、弾塑性域においても中立面の変動はほとんどみられなかった。

荷重-たわみ曲線を図-5に示す。図には、有限変位弾塑性有限要素解析結果もあわせて示す。弾性および弾塑性域において解析結果と実験結果はよく一致しているのがわかる。また、解析結果は次に示す板厚方向の残留応力の影響が大きいことを示している。

4. 残留応力測定

4.1 残留応力測定方法

逐次除去法は、原理的にも、測定方法としても最も単純かつ利用の広い基本的方法で、切り出した試験片の片側表面から逐次除去を行い、除去側の反対側に貼ったひずみゲージのひずみ変化から残留応力を求める方法である。文献¹⁰⁾では、単一材料について残留応力の求め方が示されているが、クラッド鋼は2層の複合材料であるので、それぞれの材料特性を考慮して残留応力分布を求める必要があ

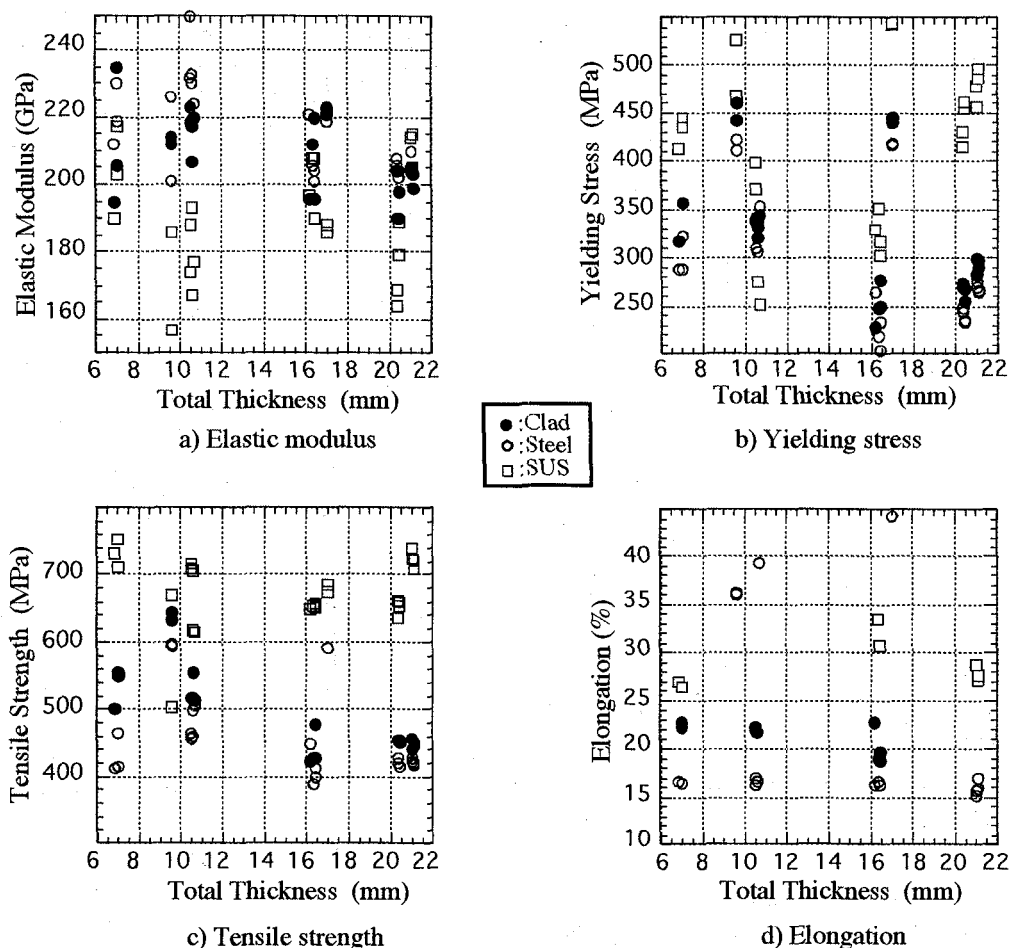


図-3 板厚による材料特性の変化

表-1 各社材料特性の平均

		実測値				公称値	実測値/公称値			
		A社	B社	C社	全体	N	A/N	B/N	C/N	全体/N
鋼	弾性係数(GPa)	211	226	217	216	206	1.024	1.097	1.053	1.049
	降伏応力(MPa)	328	335	272	299	235	1.396	1.426	1.157	1.272
	引張強度(MPa)	520	502	429	463	400	1.300	1.255	1.073	1.158
	ポアソン比	0.29	0.28	0.27	0.28					
	一様伸び(%)	39	39	16	22	15	2.600	2.600	1.067	1.467
ステンレス	弾性係数(GPa)	177	182	198	189	192	0.922	0.948	1.031	0.984
	降伏応力(MPa)	481	289	399	407	265	1.815	1.091	1.506	1.536
	引張強度(MPa)	643	610	704	672	550	1.169	1.109	1.280	1.222
	ポアソン比	0.25	0.28	0.28	0.27					
	一様伸び(%)			29	29	57			0.509	0.509
クラッド鋼	弾性係数(GPa)	207	214	210	209	203*	1.018	1.052	1.032	1.027
	降伏応力(MPa)	357	338	299	321	241*	1.484	1.405	1.243	1.335
	引張強度(MPa)	515	534	482	495	428*	1.204	1.249	1.127	1.157
	ポアソン比	0.28	0.28	0.27	0.27					
	一様伸び(%)		49	21	24					

注)：公称値Nの*付きの値は、式(1)～(3)によって計算した公称推定値である。

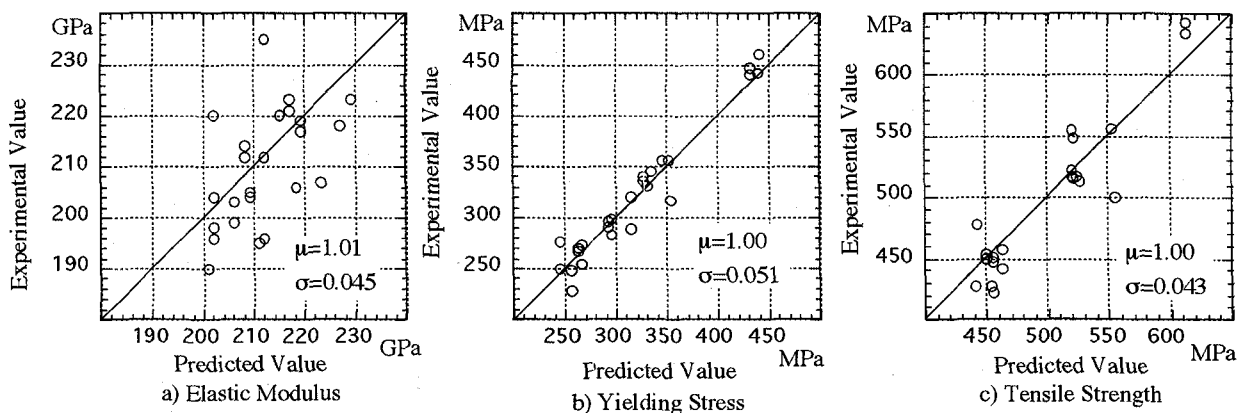


図-4 材料特性値の評価

る。

クラッド鋼から切り出された厚さ t の試験片(図-6参照)の片面から薄い層を逐次除去していくが、試験片の除去側の面から下向きに x 軸をとり、第 i 回目の除去層の厚さを Δt_i 、この薄層の残留応力を σ_i 、座標を x_i とする。また、除去された各薄層内の残留応力分布は一定($=\sigma_i$)と仮定する。

いま、 N 回の除去を繰り返し、深さ $a(=\sum_{i=1}^N \Delta t_i)$ まで除去したときの残された部分の中立軸 z_a は、

$$Z_a = \int_a^t x E(x) dx / \int_a^t E(x) dx \quad (4)$$

と表される。ここに、 $E(x)$ は座標 x における弾性係数である。

ひずみゲージを貼り付けた面の除去開始前の応力を $\sigma(t)$ とし、 N 回の除去により、この部分の応力が $\sigma^*(t)$ に変化したとする。この除去に際して軸方向の力の釣合から付加される応力を $\sigma_1(t)$ 、曲げにより付加される応力を $\sigma_2(t)$ とすると、

$$\sigma^*(t) = \sigma(t) + \sigma_1(t) + \sigma_2(t) \quad (5)$$

である。一方、図-7に示すように、この除去によるひずみの変化 ε は、軸方向の釣合から生じる一定ひずみ $\varepsilon_1(t)$ と、曲げにより生じる三角形分布のひずみ $\varepsilon_2(t)$ を用いて、

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t) \quad (6)$$

と表される。ここに、

$$\sigma^*(t) - \sigma(t) = E(t) \{ \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t) \} \quad (7)$$

で、 $E(t)$ はひずみゲージを貼付した部分 ($x=t$) の弾性係数である。

まず、軸方向の力の釣合

$$\sum_{i=1}^N \sigma_i \Delta t_i = \int_a^t E(x) \varepsilon_1(t) dx \quad (8)$$

から、

$$\varepsilon_1(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i \Delta t_i}{\int_a^t E(x) dx} \quad (9)$$

を得る。

次に、モーメントの釣合式は、次のように表される。

$$\sum_{i=1}^N \sigma_i \Delta t_i (x_i - Z_a) + \int_a^t E(x) \varepsilon_2(x) (x - Z_a) dx = 0 \quad (10)$$

さらに図-7を参照して、 $\varepsilon_2(x)$ は、ひずみゲージ位置のひずみ $\varepsilon_2(t)$ を用いて、

$$\varepsilon_2(x) = \varepsilon_2(t) \frac{x - Z_a}{t - Z_a} \quad (11)$$

となるから、式(11)を式(10)に代入して $\varepsilon_2(t)$ について解くと、次式を得る。

$$\varepsilon_2(t) = - \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i \Delta t_i (x_i - Z_a)}{\int_a^t E(x) \frac{(x - Z_a)^2}{t - Z_a} dx} \quad (12)$$

式(9)および(12)を簡素化するために、 A 、 B 、 C 、 D を次のように定義する。

$$A = \int_a^t E(x) dx, \quad B = \int_a^t E(x) \frac{(x - Z_a)^2}{t - Z_a} dx,$$

$$C = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_i \Delta t_i, \quad D = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_i (x_i - Z_a) \Delta t_i.$$

これらを用いて、式(9)および(12)を再び表せば、

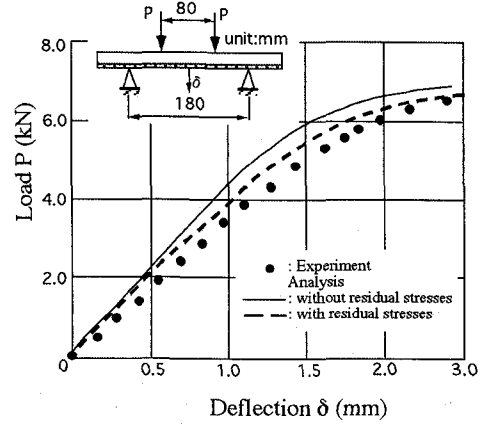


図-5 荷重-たわみ曲線
(板厚: 9mm, 裏曲げ)

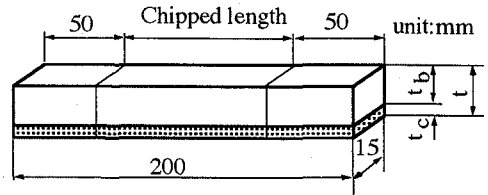


図-6 残留応力測定用試験片

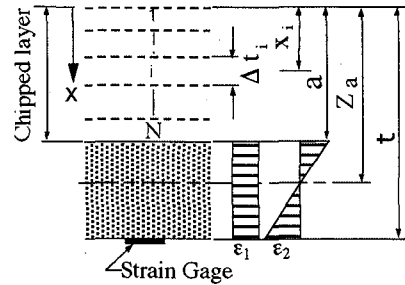


図-7 逐次除去による
残留応力測定法

$$\varepsilon_1(t) = \frac{C}{A} + \frac{\sigma_N \Delta t_N}{A}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_2(t) = - \frac{D}{B} - \frac{\sigma_N (x_N - Z_a) \Delta t_N}{B}. \quad (12)$$

上2式を式(6)に代入し、 σ_N について解くと、

$$\sigma_N = \frac{\varepsilon(t) - \frac{C}{A} - \frac{D}{B}}{\Delta t_N \left\{ \frac{1}{A} - \frac{x_N - Z_a}{B} \right\}} \quad (13)$$

が得られる。したがって、第 N 層までの除去した各板厚と

ひずみ変化を計測することにより、第N層の残留応力 σ_N を求めることができる。

4.2 残留応力測定実験概要

残留応力測定用試験片は、クラッド鋼板から圧延方向及び圧延直角方向に幅15mmの角棒をそれぞれ2体ずつ切り出して作成した。切り出した試験片の片側表面から逐次除去を行い、除去側の反対側表面のひずみと各層の除去後の板厚を測定した。試験片を図-6に示す。除去は、1つはステンレス側から、もう1つは鋼側から除去し、残留応力分布は両者を重ね合わせて求めた。なお、図-6に示すように、除去区間は中央の100mmである。

除去はエンドミルにより行った。このとき試験片に熱が発生しないように、切削中は機械油で冷やしながらできるだけゆっくりと削り取った。エンドミル刃の回転数は鋼で125回/分、ステンレスで67回/分、刃の送り速度は、鋼300mm/分、ステンレス200mm/分である。

比較のために、軟鋼（SS400、板厚20mm）の試験片1本を作成し、同様にして残留応力を求めた。この場合、製作過程で発生する残留応力分布は板中央面に関して対称となると考えられるので除去範囲は板厚の約半分で止め、残留応力分布は中央面に関して対称に描いた。結果を図-8に示す。

4.3 測定結果と考察

クラッド鋼の残留応力測定結果のいくつかを図-9～12に示す。

軟鋼のみの残留応力図-8では、表面の残留応力は約40MPaの圧縮応力で、表面から深くなるにつれ圧縮応力から引張応力に変化するのがわかる。引張応力は最大で約10MPaである。これは、冷却過程で表面が早く硬化し、続いて内部が硬化することに起因する。

鋼単一材の最大圧縮残留応力は軟鋼SS400の降伏応力（235MPa程度）の20%位であるが、圧縮応力の区間は板厚の5%程度と短く、また、板内部の引張残留応力も降伏応力の5%程度と小さいので、単一部材では板厚方向の残留応力の影響は小さいと推察される。

ところがステンレスクラッド鋼の残留応力は、図-9～12に示すように、とくにステンレスの表面で圧縮降伏応力程度の残留応力が現れている。また、鋼側の表面でも100～200MPaの圧縮応力（降伏応力の50～100%程度）で、表面から合わせ材側に近づくにつれて引張応力に変化する。母材の中央付近では、板厚6および9mmの場合、100MPa程度の引張応力がみられるが、板厚が大きくなる（クラッド比が小さくなる）と母材中央部の残留応力は小さくなる傾向がみられる。母材と合わせ材の境界面では、軟鋼側で圧縮応力、ステンレス側で引張応力となる逆転傾向

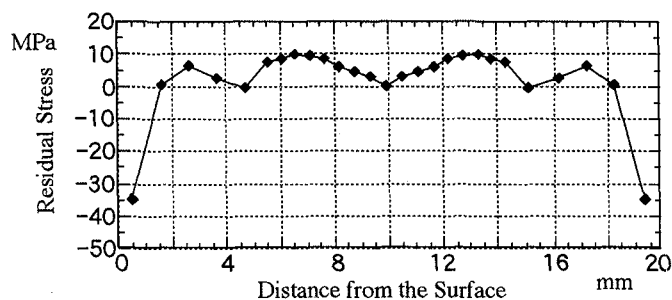


図-8 残留応力分布（軟鋼 20mm）

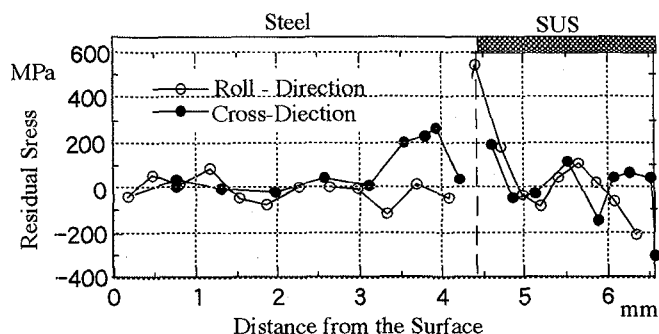


図-9 残留応力分布（板厚 6 mm）

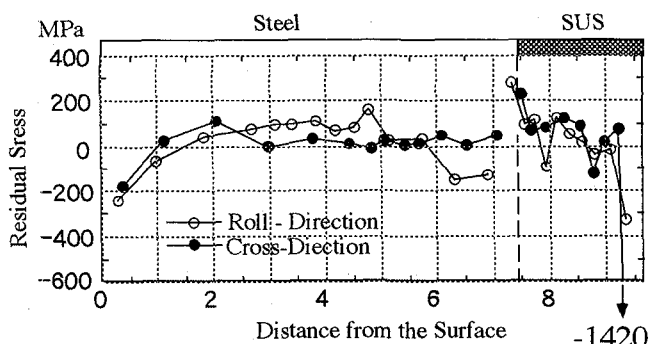


図-10 残留応力分布（板厚 9 mm）

がみられる。

以上をまとめて、残留応力の板厚方向分布を図示すると、図-13に示すようなモデル化が可能と思われる。すなわちクラッド比が大きい場合、図-13a)のように、母材-合わせ材境界面で圧縮から引張に逆転し、合わせ材では表面に向かって引張から圧縮へ変化する。一方、クラッド比が小さい場合には、ステンレス側に圧縮残留応力が卓越すると考えられる。なお、図-12a),b)を比べると、上述の傾向は共通しているものの、残留応力の値に差がみられる。これは、圧延温度等の製造過程による違いによると思われる。

圧延方向と圧延直角方向の残留応力には、有意な差はみられない。

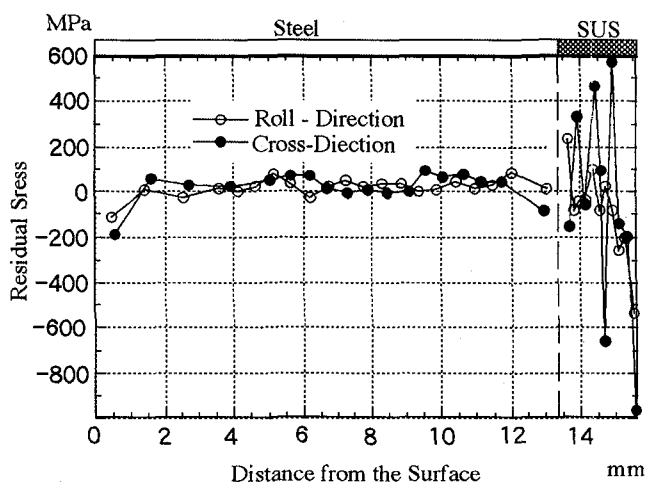


図-11 残留応力分布 (板厚15mm)

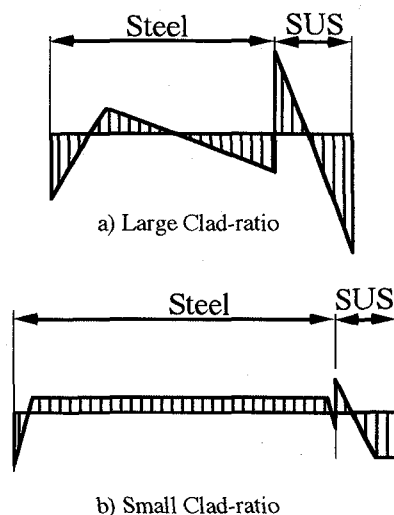
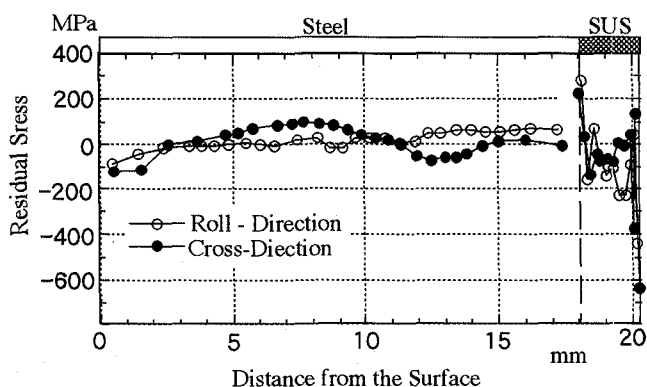
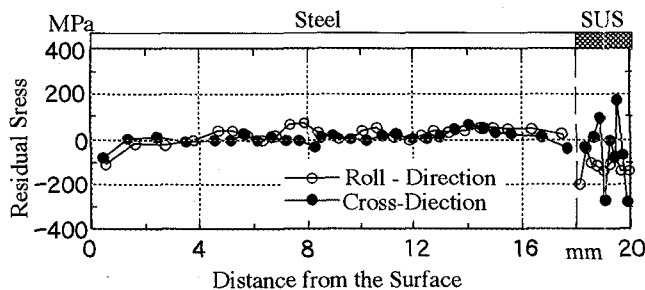


図-13 残留応力分布のモデル化



a) A社



b) C社

図-12 残留応力分布 (板厚20mm)

5. 残留応力発生の数値シミュレーション

5.1 残留応力発生メカニズムに関する一考察

以上、圧延クラッド鋼は、板厚方向に残留応力が発生することがわかった。これは、製造過程とステンレスと軟鋼両者の材料特性が大きく影響するのは明らかであろう。

スラブ圧延直後は、均一温度状態で残留応力もない。その後、表面から冷却されて、表層部は固化しても内部はまだ融点に近い状態である。このため、内部が固化するときには既に固化している表層部に拘束され、内部に引張応力が生じる。一方、表層部は内部の収縮のため圧縮応力状態となる。この発生機構は、溶接鋼 I 桁あるいは圧延 H 形鋼

などの残留応力発生機構と同じである。

ところが、ステンスクラッド鋼では、上記のほかに、異種材料からなる物理特性の違いに起因する残留応力が現れると考えられる。すなわち、(1) 熱伝導率の違いにより、冷却過程で単一材の場合とは異なる温度分布となることの影響、さらに、(2) 鋼とステンレスとの線膨張係数の差異による影響で、冷却時には、ステンレス側が凹となるたわみ（曲げ変形）が生じ、これに対応する残留応力が発生すること、そして、(3) このたわみを冷間矯正する際の塑性加工にともなう残留応力、である。

このように、ステンスクラッド鋼の残留応力は、かなり複雑な発生機構を有していると考えられる。そこで以下では、圧延後の冷却、変形、矯正という一連のクラッド鋼製造過程を数値解析し、残留応力発生メカニズムの解明を試みる。

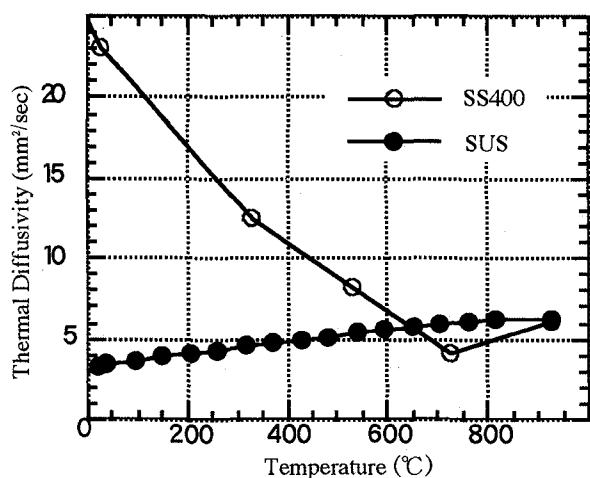
5.2 解析方法

ステンスクラッド鋼は、ステンレスと鋼板のスラブを組み立てた後、再加熱-圧延される。再加熱過程では800～1000℃程度となるが、この範囲の温度では、金属材料の物理特性は温度に依存して変化する。したがって、冷却過程では、物理特性値が温度に依存する、いわゆる場の非線形問題として熱伝導解析及び熱応力解析を行う必要がある。次に、矯正過程を再現して、熱応力解析結果を初期応力として、弾塑性解析を行った。熱伝導解析および弾塑性解析で使用した材料特性値は、文献^{11, 12)}を基に図-14～15のように仮定した。

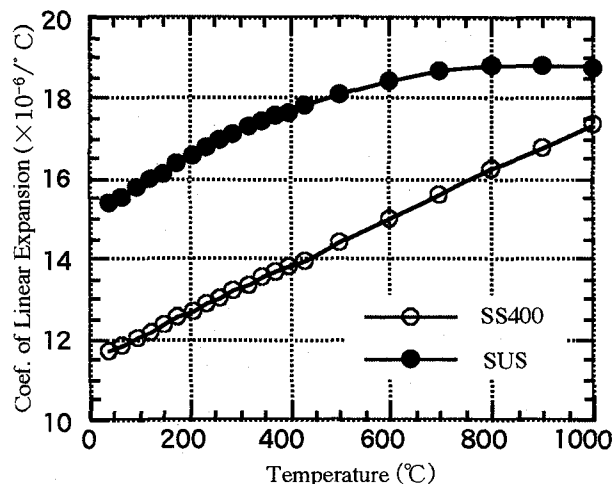
なお、解析にはABAQUAS(Ver.5.4)を使用し、要素には2次元伝熱要素と平面歪要素を用いた。

a) 熱伝導解析

解析モデルは、2つのクラッド比モデル(板厚10.5mm・

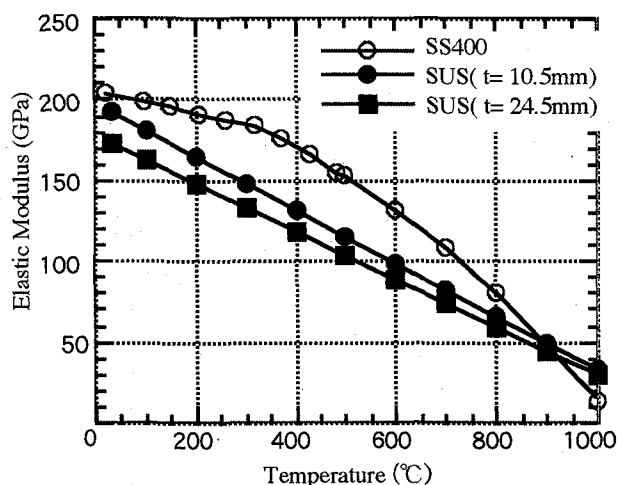


a) Thermal Diffusivity

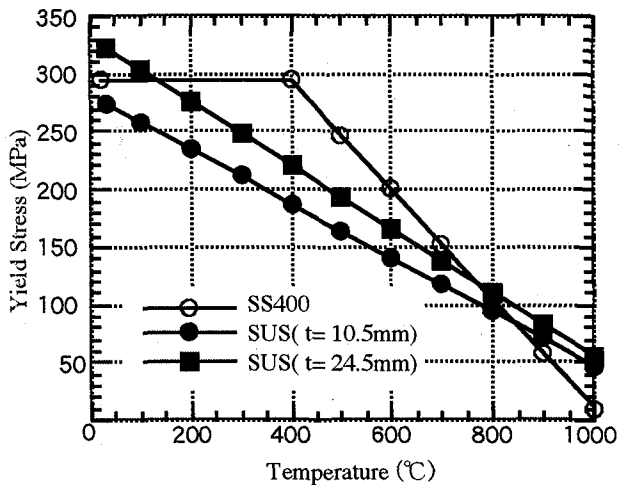


b) Coefficient of Linear Expansion

図-14 熱拡散率と線膨張率



a) Elastic Modulus



b) Yielding Stress

図-15 弾性係数と降伏応力

ステンレス厚 2mm および板厚 24.5mm・ステンレス厚 4mm)と、比較のために鋼板のみの場合(板厚 20mm)も解析した。これら解析モデルは、クラッド鋼厚 10.5mm の場合のみ 2 枚圧延、その他は一枚圧延を想定し、板表面からの放熱冷却とした。このときの熱伝達率 α は、 $\alpha = 696.5 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ とした。また、鋼板の初期温度は 1000°C 、外気温は 30°C とした。

解析で用いた要素分割及び各時間における温度分布を図-16に示す。図-16b)から、ステンレスの熱伝導率が鋼のそれより小さいのでステンレス側の冷え方が鋼側より遅い事が分かる。しかし、5分くらい経過すると、温度分布は板厚方向にほぼ一定になる事が分かる。鋼板のみの場合でも、5分くらい経過するとほぼ一定になっている。

b) 熱応力解析(鋼板のみ)

冷却過程における弾性熱応力解析と弾塑性熱応力解析との差異を調べるため、より単純な鋼板のみのモデルを用

い、熱伝導解析で得られた各時間ごとの温度状態での熱応力を求めた。解析モデルの鋼板板厚は 20mm である。

弾性及び弾塑性解析における鋼板の各時間における応力を図-17に示す。弾性解析では、図-17a)からわかるように、温度が一定となる 5 分後には全着目位置で応力がほぼ 0 となる。これは、鋼板内部の温度差が無くなった時点で残留応力がなくなることを示す。

一方、弾塑性解析図-17b)では、鋼板表面付近の要素 (Elem. 3) において圧縮応力が残留しているのがわかる。この位置では、応力のピーク値が塑性域に入ったために残留応力が発生したと判断される。

今回行った熱応力解析結果では、図-17b) に示すように、冷却途中で塑性域に入る要素はほとんどなく、常温(正確には一定温度)になった時点で残留応力は消滅しており、表面 (Elem.3) で -5 MPa 程度しかない。一方逐次除去法による測定結果(図-8)では、表面では -35 MPa と約

7 倍の値である。これについては、図-15 に示す材料特性-温度関係を仮定した結果であることに留意しておくべきであろう。図-15 は、とくに降伏応力の熱依存仮定については、筆者らが調査した限りでは信頼性の高い資料が得られておらず、かなり大胆な仮定を用いざるを得なかった。また、熱伝導解析における境界条件についても、表面冷却は熱伝達による放熱としており、水冷等の条件を考慮していない。

今回の解析の範囲では冷却過程に発生する残留応力は無視し得るほど小さく、ステンレスクラッド鋼の残留応力は、鋼とステンレスとの線膨張係数の違いによる曲げ変形およびその矯正過程によるものが主要因であるという結果となった。

c) クラッド鋼の熱応力解析
及び弾塑性解析

前項の結果より冷却過程における温度の経時変化は残留応力発生機構にほとんど影響しないという結果が得られたので、単純に再加熱時(1000℃)と常温時(30℃)との温度差により発生する弾性熱応力を初期応力とし、その後の矯正過程をモデル化した弾塑性解析を行った。

解析では、まず、冷却後に現れるステンレス側が凹となる曲げ変形状態を初期状態とし、解析モデルの端部に矯正曲げモーメントを与えた後、除荷した。このとき、除荷後のクラッド鋼板が平板となるように数回の試行錯誤を行った。得られた結果を図-18~19 に□印で示す。これらの図からわかるように、鋼部の残留応力分布は表面から内部に向かい引張から圧縮に変化しており、実験結果と異なっている。

一般に、実際の矯正過程では冷却途中および冷却後に数回のロールが施されるようである。そこで、上記の状態から除荷後の残留変形が最初の熱応力解析で得られた曲率に近くなるように、さらに曲げモーメントを負荷してみた。最終的に得られた残留応力を図-18 の◇印で示す。図に示すように、2 回目の曲げ載荷後は、実験結果すなわち、鋼表面から圧縮-引張-圧縮、そしてステンレス境界で引張に変化する応力状態をうまくとら

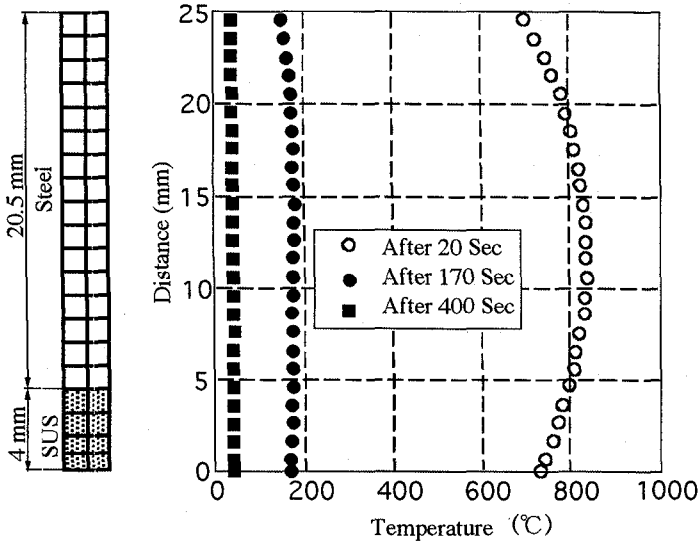


図-16 温度分布 (クラッド; 板厚=24.5mm, 1 枚圧延)

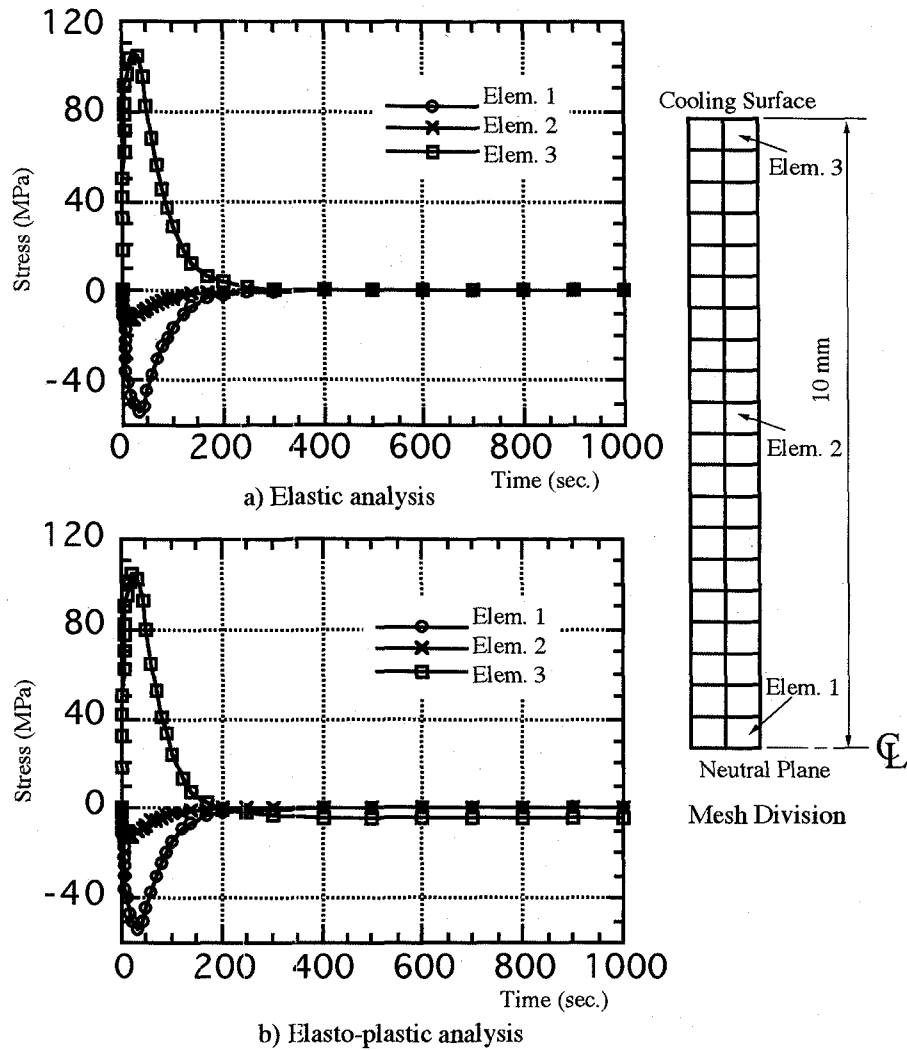


図-17 温度応力解析結果 (鋼板のみ; 板厚=20mm)

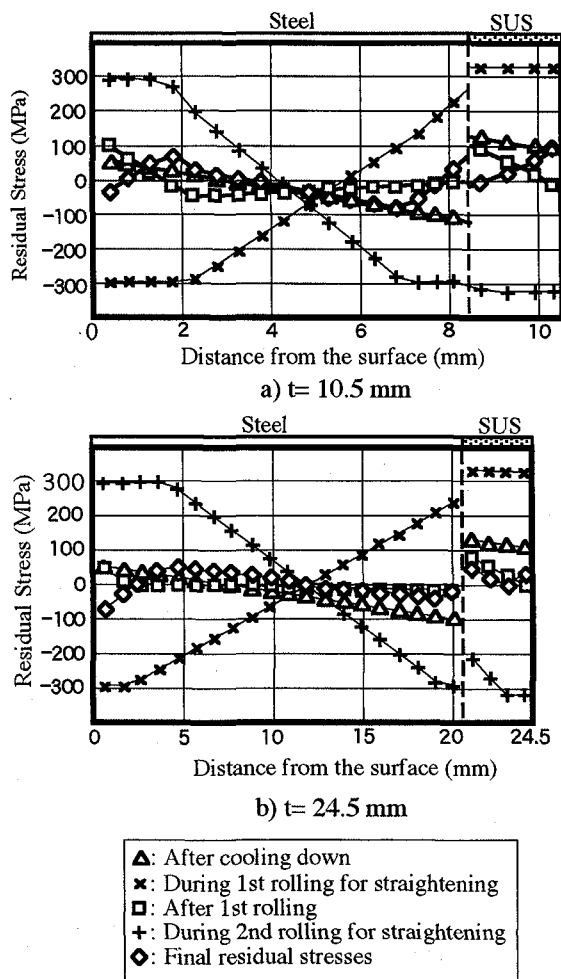


図-18 残留応力分布 (解析結果)

えているといえる。また、1回目と2回目の除荷後を比較すると、後者はステンレス内で折れ曲がるのが認められる。このことから、数回の圧延繰返しにより、ステンレス内部では振動するような応力分布が現れることが推察される。実験結果でもこの現象がみられるが、これについてはなお精度を上げた検証が必要と思われる。

図-18には、圧延冷却後の線膨張率の差による変形にもなう残留応力(△)および1回目と2回目の曲げモーメントを负荷したときの応力状態(それぞれ×, +)もあわせて示した。これらの結果から、冷却時に生じる熱応力に比べ矯正のための外力が残留応力に大きく影響することがわかる。

図-19に、残留応力の実験値と解析値を比較して示す。図から、2回目の曲げ後では、残留応力の値は実験値と差異があるものの、端部から内部への応力変化、また、鋼とステンレス界面の変化など、全体の傾向については、両者はよく対応していると思われる。なお、実験値と解析値の差異については、実際では矯正ロールを数回(今回の供試体では熱間1往復、冷間4回)行うための影響を解析に十分反映できなかったこと、また、熱間圧延後の冷却時に導

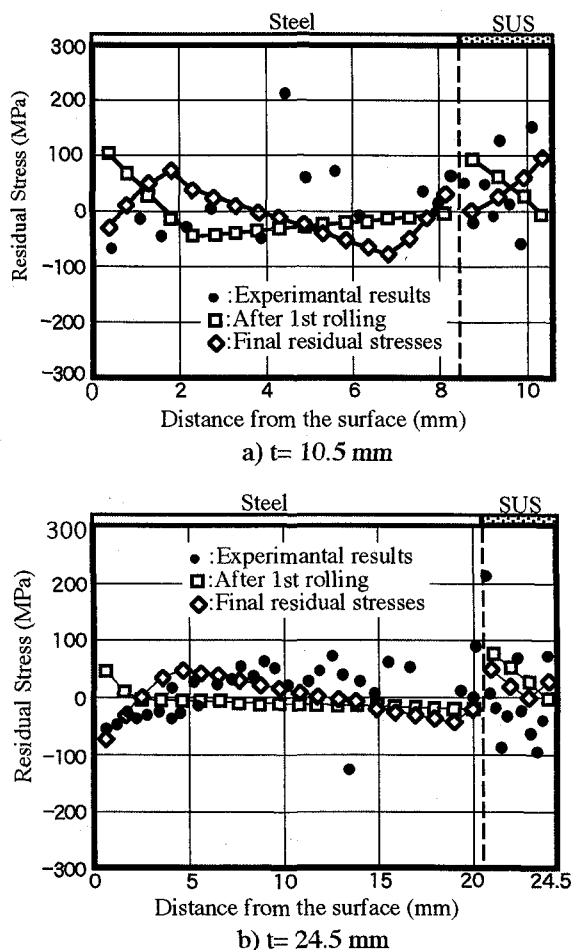


図-19 残留応力分布

入される残留応力解析における材料特性あるいは境界条件の仮定に曖昧さが残ること、そして実験測定時の精度などの要因が考えられる。しかしながら、これらの要因を正確に把握すれば、残留応力の一応の推定は可能と予想される。

6. 結論

本研究では、ステンレスクラッド鋼の材料特性を実験的に調べ、鋼のみならずステンレスも強度部材とする設計法のための材料特性評価式について検討した。さらに、板厚方向の残留応力を調べ、製造過程をモデル化した数値解析を行い、残留応力の発生メカニズムについて検討した。

まず、材料特性試験結果からは、次のことがいえる。

- (1) クラッド鋼としての弾性係数、降伏応力、引張強度ともに混合則(式(1)～(3))を用いて評価してよい。
- (2) 曲げ試験においても、母材と合わせ材を完全弾塑性材料とした混合則が適用できる。
- (3) 今回使用したステンレスクラッド鋼を構成する材料(普通鋼:SS400, ステンレス:SUS316L)の降伏応力は、普通鋼よりもステンレスの方が高く、普通鋼に対して約35

%程度高い値が得られた。また、両構成材料の伸びについても、単一材のそれよりも小さくなった。

(4)したがって、ステンレスクラッド鋼を橋梁に用いる場合、構成する材料の材料特性値は、単一材における公称値(規格値)を適用するのは必ずしも適切とはいえない。

(5)製造会社間で、材料特性にばらつきがみられる。これは、製造過程の違いによると考えられる。

また、板厚方向残留応力測定結果および数値シミュレーション結果をまとめれば、次のようになる。

(6)ステンレスクラッド鋼では、鋼単一材に比べて板圧方向に大きな残留応力が発生する。その板圧方向残留応力分布は、クラッド比により概ね図-13のように表すことができる。

(7)ステンレスクラッド鋼のステンレス側表面の残留応力は、降伏応力に近い圧縮応力、一方、鋼側表面は降伏応力の半分程度の圧縮応力となり、鋼内部は引張応力となる。そして、ステンレスと鋼の界面では、残留応力が大きく変化する。

(8)今回の解析結果では、クラッド鋼の残留応力は、冷却途中の熱塑性による残留応力はほとんど現れず、材料の線膨張率の違いによる冷却時の変形にともなう応力およびこれを矯正するための冷間矯正による応力が支配的であった。

(9)矯正過程を模擬した弾塑性解析を複数回行う事により、この過程で導入される残留応力の一応の把握は可能と思われる。

なお、熱塑性による残留応力が消滅することについては、材料特性の温度依存場の仮定、境界条件(冷却状態)の設定などのさらに詳しい検討が必要と思われる。

謝 辞

本研究は、土木学会鋼構造委員会新技術小委員会耐久性WGの一活動として行ったものである。耐久性WGの各委員および関連会社の方々には、惜しまぬご協力を賜りました。心より感謝致します。

参考文献

- 1) 後藤, 関口, 松田, 藤田, 安波, 藤井, 三木: ステンレスクラッド鋼を用いた実寸断面橋梁部材の試作について, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.965-974, 1996.3.
 - 2) 藤井, 三木, 木村, 中川, 安波: ステンレスクラッド鋼を用いた箱桁の曲げ疲労実験, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.1041-1050, 1997.3.
 - 3) Pluyette E., Sprauel J.M., Buisine D.: Evaluation of Residual Stresses in Stainless-steel Claddings, Experimental Mechanics an International Journal, Vol. 35, No.3, pp.205-211, 1995.3.
 - 4) 稲垣, 恩澤: ステンレスクラッド鋼に関する総合的研究, 圧力技術, 1997.
 - 5) 土木学会鋼構造新技術小委員会最終報告書(耐久性研究), 土木学会, 1996.5.
 - 6) 土木学会: 座屈設計ガイドライン, 1987.
 - 7) 稲垣, 恩澤, 原, 金子, 菅野, 久保田, 近藤: 圧力技術の現状と将来 16. クラッド鋼, 日本高圧力技術協会, pp.241-264, 1989.
 - 8) 日新製鋼(株): ステンレス鋼の手引き
 - 9) 日本製鋼所他: ステンレスクラッド鋼の機能材料としての優位性について, クラッド研究小委員会資料, 1988.
 - 10) 米谷茂: 残留応力の発生と対策, 養賢堂, 1975.8.
 - 11) 日本機会学会: 伝熱工学資料, 三美印刷, 1989. 3.
 - 12) ASME: Boiler and Pressure vessel code CODE CASES Nuclear Components, 1986.6.
 - 13) 日本企画協会: J I Sハンドブック鉄鋼, 1993.
 - 14) 日本高圧力技術協会クラッド研究委員会: クラッド鋼溶接の実際, 産報出版, 1992.9.
 - 15) 土木学会鋼構造委員会: 鋼構造の新技術に関する調査研究報告書(中間報告), 土木学会, 1993. 3.
- (1997年9月26日受付)