【土木学会論文集　第362号／I-4　1985年10月】

応力作用下で溶接された継手の機械的性質および残留応力

MECHANICAL PROPERTIES AND RESIDUAL STRESS OF JOINTS WELDED UNDER LOADING

鈴木博之*・堀川浩甫**
By Hiroyuki SUZUKI and Kohsuke HORIKAWA

One of the remaining problems in field welding is application to members under loading. There is a few study in this problem. The authors reported "Deformation behaviors of plates welded under loading" and "Welding to pipe column under axial compressive load". These studies are related to initial imperfection of members and load carrying capacity after welding.

This paper describes experimental study on mechanical properties and residual stress of joints welded under tensile or compressive loading, and F.E.M. analysis on transient stress during weld heat conduction and residual stress.

1. はじめに

第33回土木学会全国大会において橋梁の現場溶接についての研究討論会が催され，未解決の問題の1つとして供用中で応力が働いている部材への溶接が挙げられた[1]．その要点は

① 継手品質
② 継手あるいは構造物の性能に及ぼす残留応力の影響
③ 構造物としての出来上り精度
④ 工期・工費

などへの懸念であった．ここで，④は経済的側面からの検討を必要とするものである．

供用中の橋梁には死荷重および活荷重が作用しているので，補修・補強作業はステージング等を使用して死荷重による応力を軽減し，交通遮断して活荷重による応力ならびにそれに伴う複雑な振動を除去した状態で行われることが多い．しかし，ステージングを設置することは経済的に負担であり，交通遮断を行うことは社会的影響が大きい．また，溶接を使用すると溶接熱が構造物の剛性・強度を一時的に低下させるおそれもあるので，H.T.ボルトが使用されがちである．しかし，H.T.ボルトの使用は既設部材に孔明けすることになるので，施工が容易でなく，その後の補強も大がかりとなる．したがって，死荷重あるいは活荷重が作用したままの状態で溶接することができればそのメリットは小さくない．

このような補修・補強溶接に関する研究もいくつか行われている[2]．著者らはこれまでに応力作用下にある平板に溶接を施したときの変動挙動，および圧縮応力作用下にあるパイプ柱に溶接を施した後の耐荷力について検討し，報告した[3),4)]．これらは上記②の構造物の性質および③の出来上り精度に関するものである．

今回，前記①および②に関連して，引張および圧縮応力作用下で溶接された継手の機械的性質および残留応力について実験的に検討した．さらに，溶接による熱が部材を伝導していく過程の過渡的な応力挙動ならびに残留応力についてFEM解析による検討を加えたので，ここに報告する．

2. 実験方法

実験の対象とした継手の種類は，

① 引張荷重軸に平行に溶接（LT）
② 圧縮荷重軸に平行に溶接（LC）

* 正会員　工修　大阪大学助手　溶接工学研究所
（〒567　茨木市美穂ケ丘11-1）
** 正会員　工博　大阪大学助教授　溶接工学研究所（同上）

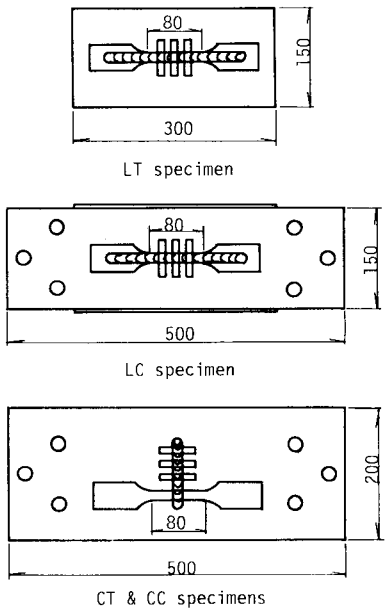

Fig. 1 Specimen configurations.

③ 引張荷重軸に垂直に溶接（CT）

④ 圧縮荷重軸に垂直に溶接（CC）

より成る．

試験片形状を Fig. 1 に示す．実験は 2 回に分けて行われた．材質は LT が SS 41，LC，CT，CC が SM 41 B で，板厚はすべて 6 mm である．LT，LC には深さ 3 mm，幅 5 mm，長さ 250 mm，CT，CC には深さ 2 mm，幅 5 mm，長さ 100 mm の溝加工を施し，細径（2.0 ϕ）サブマージアーク溶接機で溶接した．ただし，LT の残留応力測定用試験片は溝なしのビートオンプレートとした．LC では実験中の座屈防止のため幅 30 mm のフランジを設け，フランジを溶接した後 SR 処理を行った．また，CC では座屈防止のフランジは用いず，L 50×50×4×280 のアングルをクランプで固定して座屈防護とした．

応力の負荷条件は

Ⅰ． 無負荷で溶接

Ⅱ． 無負荷で溶接後，許容応力度（140 MPa，以下同じ）に等しい応力を負荷

Ⅲ． 許容応力度に等しい応力の作用下で溶接

Ⅳ． 無負荷で溶接後，許容応力度に等しい応力の作用下で溶接

の 4 種類である．LT，LC は上記の 4 種類，CT，CC は上記のⅠとⅢの 2 種類について実験した．応力の負荷は溶接中および溶接後室温に冷却するまで荷重を一定に保つ荷重制御で行い，室温まで冷却した後，除荷した．このようにして作成した溶接継手から Fig. 1 に示すように平行部長さ 80 mm，幅 15 mm の引張試験片と，5×10 のサブサイズ 2 mmV ノッチシャルピー試験片 3 本を採取した．

残留応力測定実験は LT，CT，CC について行った．LT については 250 MPa の引張応力を与えた状態で溶接を行ったものをⅤとして付け加えた．測定は切断法である．

3. 実験結果および考察

（1） 機械的性質

引張試験およびシャルピー衝撃試験の結果を Fig. 2 に示す．衝撃試験の結果は 3 本の平均である．CT および CC の引張試験における破断位置はいずれの試験片においても母材であった．Fig. 2 より明らかなように，いずれの試験片においても降伏点，引張強さ，伸びにほとんど違いが認められない．シャルピー吸収エネルギーにおいては LC のⅣがⅠ～Ⅲに比べて高い値を示している

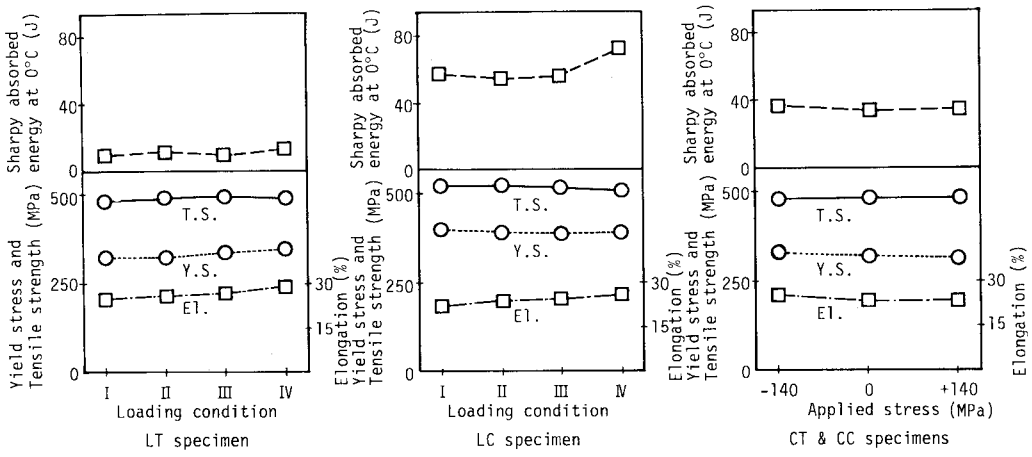

Fig. 2 Mechanical properties.

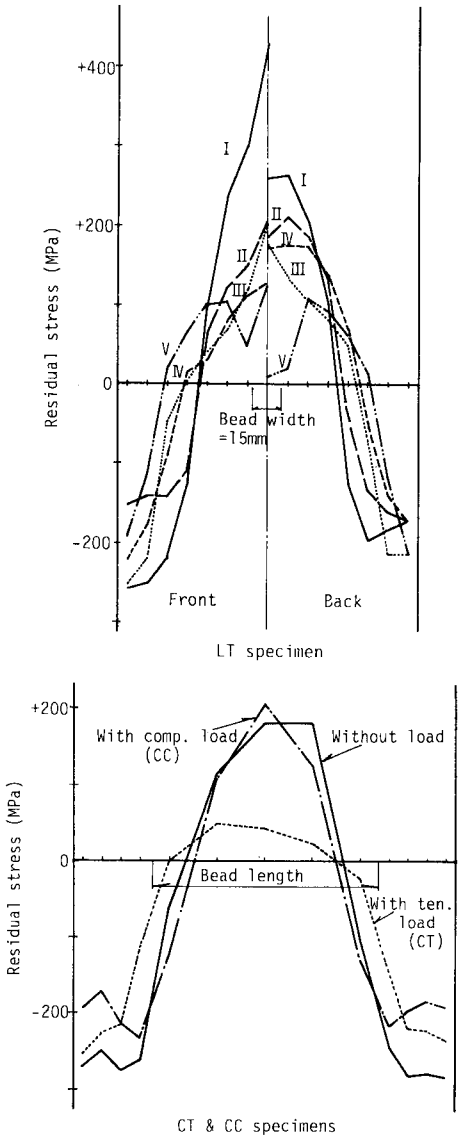

Fig. 3　Residual stress distributions.

が，これは既存のビードの上に重ねて溶接したために溶接金属の組織が細粒化され，靭性が向上したものと考えられる．これと同様のことがその程度はわずかであるがLTにおいても認められる．

（2）残留応力

荷重軸方向の残留応力測定結果を Fig. 3 に示す．CT および CC は表裏面の平均値である．LT のⅠがビード上でかなり高い値を示しているのは，溶接金属が500 MPa級の材料であること，また，溝なしのビードオンプレートであるので無負荷で溶接された場合，曲げ変形がⅡ～Ⅴに比べて大きいことなどのためであると考えられる．この曲げ変形の影響は引張負荷が与えられた状態で溶接されたⅢにおいて表裏の差が少ないことからもわかる．表裏を平均してみると溶接中あるいは溶接後に引張負荷を与えたⅡ～Ⅴの残留応力はⅠに比べて，その負荷応力 140 MPa あるいは 250 MPa だけピークが低下している．また，ビードから離れた位置の圧縮残留応力も引張残留応力の緩和分の反力に相当するだけ減少している．

作用応力に垂直に溶接された CT および CC においては，引張応力作用下で溶接された継手の引張残留応力は作用応力相当分だけ緩和され，圧縮残留応力も引張残留応力の緩和分の反力に相当する分だけ減少している．これに対し，圧縮応力作用下で溶接された継手では溶接ビード上の引張残留応力は無負荷で溶接されたものとよく似たものとなっているが，ビード以外の部分の圧縮残留応力は無負荷の場合に比べて平均で 100 MPa 程度減少している．

（3）考　　察

ここで，残留応力について考察を加える．

溶接されたときの応力履歴の模式図を Fig. 4 に示す．熱応力は

$$\sigma_\theta = -E\alpha\theta \quad \cdots\cdots (1)$$

ここに，E はヤング率，α は線膨張係数，θ は温度である．

で表わされるので，無応力下で溶接された場合（Fig. 4 (b)），温度の上昇とともに圧縮応力が弾性的に増加する．一方，降伏応力度は低下するので，A 点において降伏する．さらに温度が増加しても降伏応力度を維持し，AB に沿って移動する．そして，冷却過程に入ると圧縮応力は BC に沿って弾性的に減少し，C 点で引張応力になる．この引張応力は冷却とともにさらに増加し，D 点で引張降伏応力度に達する．その後室温まで引張降伏応力度を保ち続けるので，溶接ビードおよびその近傍の残留応力は引張降伏応力度となる．

式（1）より

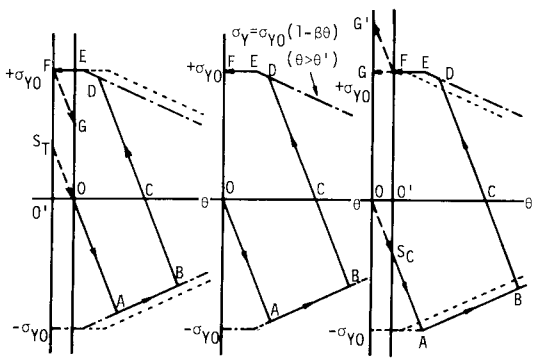

Fig. 4　Stress histories with temperature.

$$\theta=-\frac{\sigma_\theta}{E\cdot\alpha} \quad \cdots\cdots(2)$$

を得る．したがって，引張荷重下にあるということは Fig. 4(b) の縦軸が O から O′ に移動することになり，溶接前の状態は S_T に対応する．OO′ の移動の 1 つの目安として，$\sigma=140$ MPa 作用下であるとすると，$E=2.1\times10^5$ MPa，$\alpha=1.05\times10^{-5}$°C^{-1} を式 (2) に代入し，$\theta=-63$°C を得る．この状態で溶接されるとその応力履歴は無負荷での溶接と同様の経路 S_TOABCDEF をたどり，室温まで冷却したときの残留応力は引張降伏応力度となる．ここで除荷すると引張降伏応力度に等しい残留応力は弾性的に減少し，S_TO に平行に G 点に達する．したがって，引張荷重作用下で溶接された継手のビードおよびその近傍の残留応力は除荷後負荷応力相当分だけ緩和され，その引張応力の緩和量の反力に相当するだけ圧縮残留応力も低減されることがわかる．

圧縮荷重作用下での溶接においては溶接前の状態は S_C に対応する．この状態で溶接されるとその応力履歴は他の場合同様加熱，冷却に伴い，S_CABCDEF の経路をたどり，室温まで冷却したときの残留応力は引張降伏応力度となる．ここで圧縮の外荷重を除荷することは弾性体であれば引張応力を増加させ，FG′ に沿った挙動を示すことになるが，弾塑性体の場合には降伏現象により降伏点を越える引張残留応力は消失し，降伏点に抑えられるので，FG に沿った挙動を示す．したがって，圧縮荷重作用下で溶接された継手のビードおよびその近傍の残留応力は除荷後においても低減されることはないが，引張残留応力の反力である圧縮残留応力が引張残留応力の消失分（Fig. 4(c) の FG′）に相当するだけ緩和されるものと考えられる．

4. FEM 解析方法

溶接による熱の伝導過程中の過渡的な応力挙動を求めるために有限要素法による熱弾塑性解析を行った．解析対象は LT および LC の応力の負荷条件Ⅲを想定したものであり，Fig. 5 に示す．

熱弾塑性解析に先立ち，熱伝導解析を行った[7]．初期温度としてビード部には 1 500°C の瞬間平面熱源を与え，他は 20°C の室温とした．

熱弾塑性解析においてヤング率，降伏応力度，線膨張

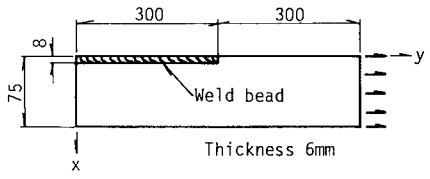

Fig. 5 Analytical model.

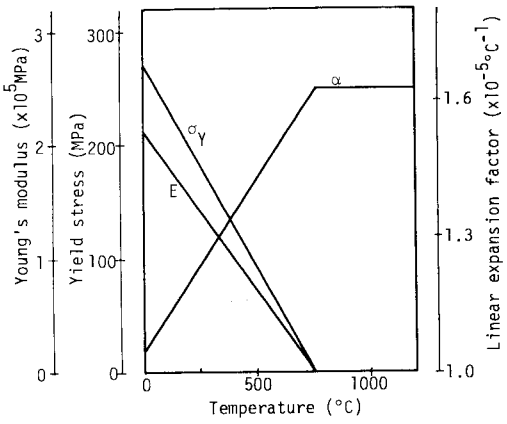

Fig. 6 Material properties.

係数の温度依存性を Fig. 6 のように仮定した[3]．ポアソン比は 0.3，加工硬化係数は 1.26×10^3 MPa とし，温度依存性はないものとした．

解析ケースは次の 3 種類とした．

1) $\sigma=140$ MPa 作用下での溶接
2) 無応力下での溶接
3) $\sigma=-140$ MPa 作用下での溶接

外力が加わるケース 1) と 3) では公称応力が許容応力度になるような荷重を作用させ，その後，瞬間熱源を与えた．この熱により平板は膨張あるいは収縮し，応力の弛緩もしくは緊張が生じるので，これに対応する荷重を荷重増分として作用させることにより，外荷重を一定に保った．

5. FEM 解析結果および考察

$y=30$ mm の断面における代表的な 3 点の応力の経時変化を Fig. 7 に，また，$y=30$ mm の断面における入熱後 6.4 秒経過したときの温度分布と応力分布を Fig. 8 に示す．

ケース 3) では瞬間熱源投与後約 45 秒で計算を打ち切った．この理由は以下のとおりである．

温度変化がある場合の要素の応力は温度変化による応力と外力による応力の和であるので，増分形を用いてベクトル表示すると，

$$|d\sigma|=|d\sigma_\theta|+|d\sigma_p| \quad \cdots\cdots(3)$$

となる．

要素の温度が上昇すると式 (1) から明らかなように要素に圧縮応力が生じることになるので，式 (3) の $|d\sigma_\theta|$ は圧縮の応力増分である．また，本解析においては外荷重を一定に保つように荷重増分を与えているので，部材全体が熱により膨張し始めると引張の荷重増分を与えることになる．それゆえ，式 (3) の $|d\sigma_p|$ は引張の応力増分である．すでに引張で降伏している要素で

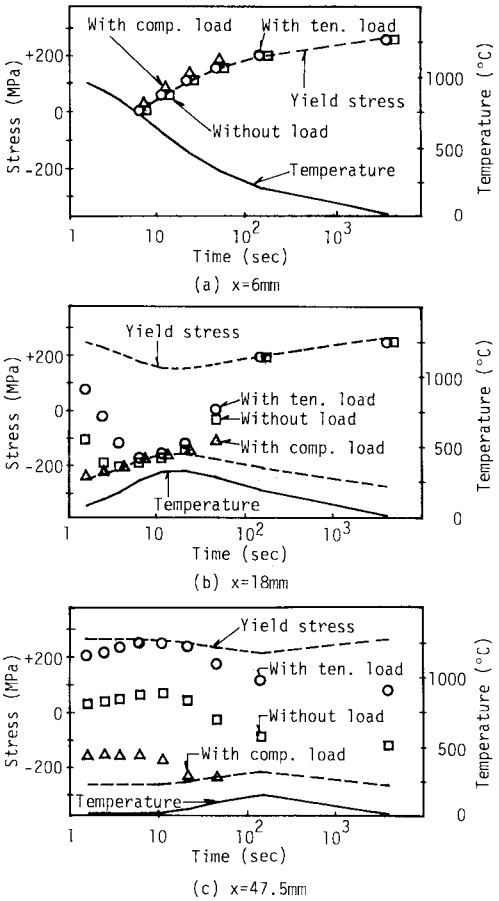

Fig. 7　Stress and temperature histories with time.

は圧縮応力である熱応力増分は除荷するように作用するのに対して，引張の荷重増分は塑性状態を持続するように作用する．もし，熱応力増分が大きい場合にはこの要素には除荷が生じ，弾性挙動を示す．その結果，次段階の荷重増分により過大な引張応力が生じ，要素は再降伏する．ケース3）においてはこの現象が生じ，要素の状態が振動し始めたが，ケース1）および2）の結果が得られ，先に考察した応力履歴を確認し，実験結果と比較できたので，ケース3）の応力履歴を確認するためには十分であると判断し，以後の計算を打ち切ることにした．

Fig. 8 において，$x=2$ mm の点は温度が 750°C 以上であるので応力の負担はないが，$x=6$ mm から約 20 mm までの範囲は圧縮で降伏している．その範囲は圧縮荷重が加わる場合が最も広く，引張荷重が加わる場合が最も狭い．しかし，引張荷重が加わる場合には $x=35$ mm 以上の範囲で引張により降伏している．これは作用荷重による機械的応力と熱応力によるためであり，熱源が投与されてから 6.4 秒経過したときに，引張荷重が作用した場合には断面の約 85 %，無負荷の場合には約 30

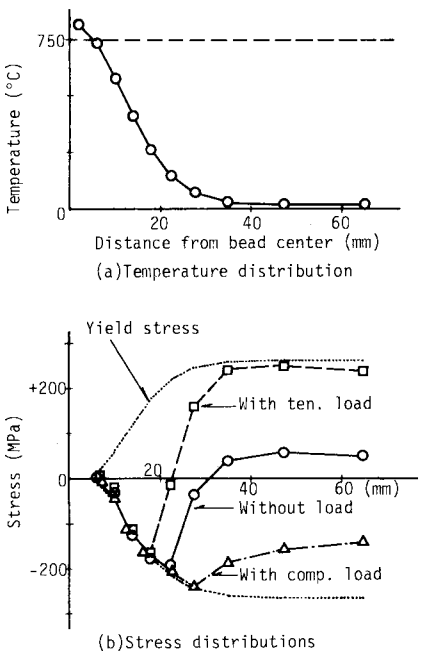

Fig. 8　Stress and temperature distributions.

%，圧縮荷重が作用した場合には約 35 % が降伏し，引張荷重が作用した場合には他の場合に比べて降伏域の広がりが大きいことがわかる．また，圧縮荷重が作用する場合，計算を打ち切る直前では降伏域は断面の約 90 % であった．無負荷の場合における弾性域を作用荷重に相当する量だけ引張側あるいは圧縮側にシフトし，降伏応力度で頭打ちにすることを考慮すると，引張あるいは圧縮荷重が加わる場合にほぼ一致することからも，荷重が加わる場合の過渡的応力分布は熱による応力と作用荷重による機械的応力の和であることがわかる．また，作用荷重による機械的応力が既知であれば，逆に，無負荷における溶接熱による熱応力を求め，過渡状態における応力分布を推定することが可能であると思われる．

Fig. 9 に温度変化に伴う応力履歴の一例を示す．いずれの場合においてもビード部では剛性が回復し始める 750°C までは応力の負担はなく，応力を負担し始めてからは室温まで常に引張で降伏し続けていることがわかる．引張荷重が加わる場合については除荷過程についても解析した．その結果によれば，除荷により作用応力に相当する応力が減少し，ビード部ではおよそ 120 MPa となった．

$x=14$ mm の位置の応力履歴は Fig. 4 に示した挙動によく一致し，引張荷重が加わる場合，無負荷の場合の縦軸が低温側へ，圧縮荷重が加わる場合は高温側へ移動している．

ビードから十分離れた位置の応力履歴はビード部およ

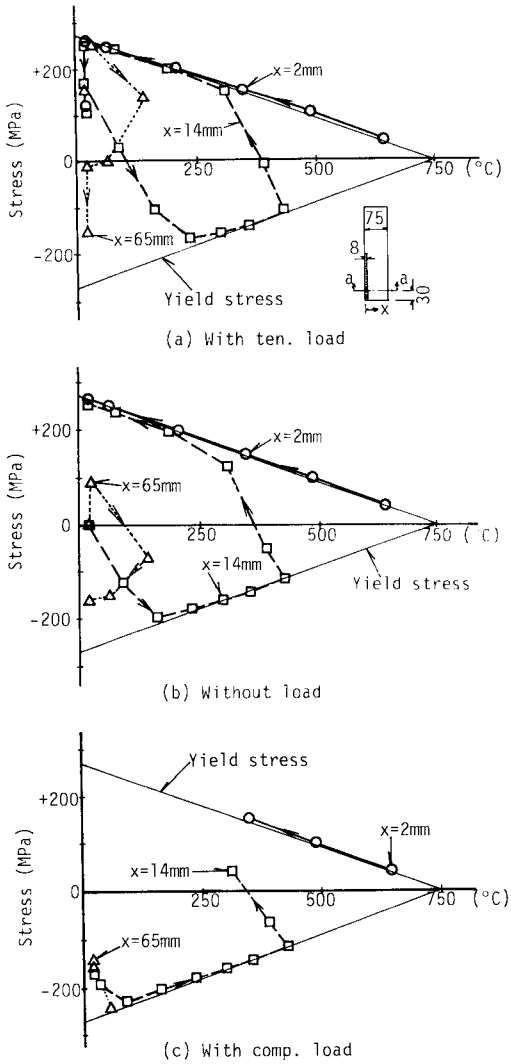

Fig. 9 Stress histories with temperature.

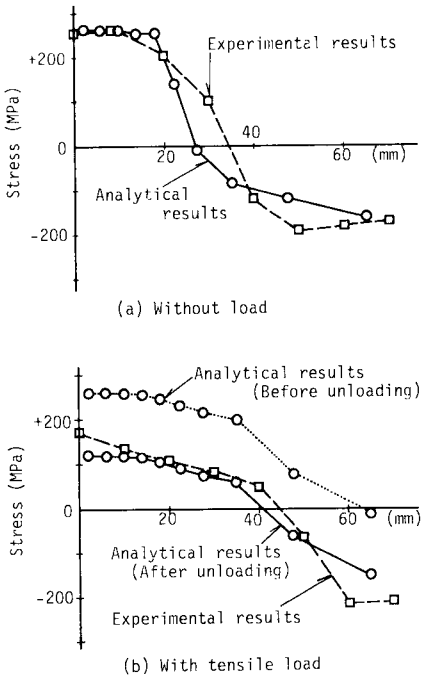

Fig. 10 Residual stress distributions.

びその近傍の応力の反力としての挙動をよく示している．無負荷の場合には室温に冷却されるまでこの位置は降伏することはないが，引張荷重が加わる場合には室温まで冷却される過程で引張で，圧縮荷重が加わる場合には圧縮で降伏することがわかる．外荷重の影響はこの位置の応力履歴の広がりにも現われている．

ケース1）と2）について $y=30$ mm の断面における荷重軸方向の残留応力分布を実験結果と合わせて Fig. 10 に示す．なお，実験結果はLTのⅠとⅢに関するものであり，表面は溶接金属の降伏応力度の影響が著しいので裏面のデータを使用した．外力の有無によらず，解析結果は実験結果とよい一致を示しており，今回の解析の妥当性を表わしていると思われる．$\sigma=140$ MPa 作用下での残留応力は除荷の前後において分布形状に違いは認められず，ほぼ一様に作用応力相当分だけ残留応力が低減している．これは先に考察したように引張で降伏した領域も除荷の場合には弾性挙動を示すためである．しかし，この除荷は実験において行われる作業であって，実構造物では死荷重が作用したままであるので，溶接残留応力は Fig. 7(b) の除荷前の分布に近いものであると考えられる．特に，全荷重に占める死荷重の割合が大きいといわれている道路橋においては残留応力分布は除荷前の状態に類似していると思われる．

6. ま と め

引張あるいは圧縮荷重が作用している平板に荷重に平行あるいは垂直に溶接を施し，その継手の機械的性質および残留応力を求めた．次に，荷重作用下で溶接を行ったときの溶接熱の伝導過程中の過渡的応力および残留応力を求めるために有限要素法を用いた熱弾塑性解析を行った．

本研究の成果を要約すると以下のとおりとなる．

実験結果によれば，

（1） $\sigma=\pm140$ MPa が作用している平板に応力に平行あるいは垂直に溶接を施しても，無応力下で溶接された継手に比べて降伏点，引張強さ，伸び，シャルピー吸収エネルギーが特に劣化することはない．

（2） $\sigma=+140$ MPa が作用している平板に応力に平行あるいは垂直に溶接された継手の引張残留応力は作用

応力相当分だけ緩和され，圧縮残留応力も引張残留応力の緩和分の反力に相当するだけ減少した．しかし，実構造物においてはこの緩和は期待できないものと考えられる．

（3） $\sigma=-140$ MPa 作用下の平板に応力に垂直に溶接された継手の引張残留応力は緩和されない．

$\sigma=\pm140$ MPa 作用下の平板に応力に平行に溶接した場合の残留応力についてFEM解析を行い，確認した．

そのFEM解析結果によれば，

（4） 引張荷重が作用する場合，過渡的な応力の再配分により断面の8割以上が降伏する場合がある．このことは補修・補強溶接作業中あるいは作業後常温まで冷却する間に変形が増加する可能性があることを示している．また，この変形が拘束される場合には溶接部に割れが生じることも考えられる．

（5） 圧縮荷重が作用する場合，過渡的な応力の再配分による降伏域は，本研究の範囲で9割を越えることがあった．したがって，圧縮荷重が作用する場合には溶接部だけでなく，未溶接部分にも降伏域が存在することを考慮して部材の剛性を算定し，補修・補強溶接作業中および作業後の安全を確認しなければならない．

FEM解析は小型試験片に対して行ったものであり，小型試験片による実験も含めて実構造物の挙動[4),10)]を予測するために必要な基礎的資料を得るために行ったものである．

謝　辞：本研究は堀川の指導のもとに昭和53，54年頃，徳沢直紀（当時，大阪大学溶接工学研究所助手）および柴崎啓二（当時，大阪大学工学部学生）によってなされた研究を引き継いで行ったものである．また，実験は本研究所 中辻義弘技官の協力に負うところが大きい．

本研究の一部は文部省科学研究費の補助を受けた．記して謝辞とします．

参考文献

1) 倉西・田島：橋梁の現場溶接，土木学会誌，Annual '79, Vol. 64-4, pp. 35～40, 1979.
2) Horikawa, K. and Suzuki, H. : Studies on Repair Welding in Japan, IIW Doc. XV-581-85.
3) 鈴木・堀川：応力作用下で溶接された平板の変形挙動，土木学会論文集，第350号／I-2，pp. 237～242，1984年10月．
4) 鈴木・堀川：圧縮荷重作用下にあるパイプ柱への溶接，土木学会論文集，第356号／I-3，pp. 489～497，1985年4月．
5) 徳沢・堀川：応力作用下にある平板への溶接，土木学会第34回年次学術講演会講演概要集I-146，昭和54年．
6) 柴崎ほか：応力を付加された板へ溶接を施したモデルの熱弾塑性解析，土木学会第35回年次学術講演会講演概要集I-114，昭和55年．
7) 山川武人：マトリックス有限要素法の構造物の非線形挙動解析への適用に関する研究，学位論文，1972年．
8) 土田幸雄：有限要素法の溶接力学への応用，圧力技術，Vol. 12, No. 3, pp. 30～38, 1974.
9) 山田嘉昭：コンピュータによる構造工学講座II-2-A，塑性・粘弾性，培風館，1970.
10) 堀川・鈴木：荷重作用下にあるプレートガーダーへの溶接，土木学会論文集投稿中．

（1985. 2. 4・受付）