研究論文

光干渉を利用した溶接部の残留応力分布(第1報)*

—観察原理とその適用例—

加藤 昇** 田村 博** 小林卓也***

Observation of Residual Stress Distributions in Welds
by Use of an Optical Interference Method (Part 1)*

—The Principles and a Few Examples of the Observation—

by Noboru Kato**, Hiroshi Tamura** and Takuya Kobayashi***

This paper describes a new measuring method of residual stress distributions in welds qualitatively using an optical interference method. The principle of this method is based on measuring by an interference fringe (surface relief), induced on a specimen when deformed and/or treated by stress-relief annealing. The method may be characterized mainly in the following measurements:

- 1) Only by lapping a surface of a specimen, the location of stress concentration and the range of plastic deformation can be easily known.
- 2) Combined with cutting and annealing, unique patterns of surface relief are revealed respectively due to stress release in z -, xy -, and xyz - directions.
- 3) This method can be also utilized under subzero temperature, and furthermore, even at higher temperature by use of a laser.

1. 緒 言

溶接部近傍には種々の割れが発生することがよく知られている。これらの割れの原因には、溶接熱による収縮応力、母材の変質、水素の集合などのほか、溶接部の局部的な応力分布などを考えなくてはならない。

ところで、このような微小部分の残留応力分布は測定が非常に困難であるため、現在までのところほとんど求められていない。一部では有限要素法による熱弾塑性解析が行われているが、溶接部の冷却途上におこる変態膨張や変態超塑性現象、ヤング率および降伏応力の変化など、いろいろ複雑な現象を考慮した場合、非常な困難をともなう。

また、X線法による測定も行われているが、溶接金属における柱状晶の生成、熱影響部での結晶の粗大化など測定上困難な点が多い。そこで著者らは、溶接による内部応力が存在する鋼を焼鈍によって応力除去し、その際に板表面にできる凹凸の変化から残留応力分布を知ると

いう新しい方法を考えた。凹凸の変化の観察には光干渉を利用して得られた干渉縞を用いた。

本観察法も、定量的にはもちろん定性的にもいろいろと解決しなければならない問題点をもつが、非常にかんたんな操作で応力分布と類似の等高線が得られるという特長がある。以下に本法の測定原理と2, 3の適用例をのべる。

2. 観 察 原 理

2.1 弾性応力分布の観察

Fig. 1-(a) のような応力集中部に一辺 l の小立方体を想定し、これが x 方向に一軸に引張られている場合を考える。いま x 軸方向のひずみを ϵ_x 、ポアソン比を ν とすると、各辺の長さは (b) のように変化する、すなわち、この部分の板厚 (z 方向) は ϵ_x の大きさに比例して収縮する。したがって、応力集中部の板厚分布を測定すれば、その部分の x 方向の応力分布が定性的に知られる。

なお、このような応力集中部で上図の関係式が成り立つのは、周囲の拘束が無視できるような板の表層部のみであるから、一般にはこのような板厚変化(板表面の凹

*原稿受付 昭和52年10月31日(昭和49年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 東京工業大学 Member, Tokyo Institute of Technology

***正 員 船舶技術研究所 Member, Ship Research Institute

Fig. 1 Change of length in a small cube located at the notch-tip.
(a) a notched specimen
(b) a small cube enlarged

凸分布)は定性的な応力分布のみを表す。ただし、切欠部の形状等の条件を一定にすれば、その条件内では応力分布の定量化も可能になる。

2.2 残留応力分布の観察

1) 応力焼鈍変形に対する x 方向応力の影響

Fig. 1-(b) の立方体の体積 V は ϵ_x によって

$$V = l^3(1 - \epsilon_x)(1 - \nu\epsilon_x)^2$$

となるが、これに鋼のポアソン比 $\nu = 0.3$ を入れると、 $V = l^3(1 + 0.4\epsilon_x)$ となり、ほぼ $0.4\epsilon_x l^3$ の体積変化に相当する弾性ひずみエネルギーを鋼の内部に蓄積する。このような弾性ひずみをもつ鋼が焼鈍されて、その内部が無応力状態にもどったと仮定した場合の変形の状態は、一般に鋼の塑性変形と同様に考えることができる。すなわち、鋼の x 方向の長さを $l(1 + \epsilon_x)$ に保ったまま焼鈍した場合、 z (および y) 方向の厚さは塑性変形の場合と同様に $l(1 - 0.5\epsilon_x)$ となる。つまり、 x 方向に ϵ_x 相当する引張残留応力をもつ鋼を焼鈍した場合、その部分の板厚はさらに $0.2\epsilon_x l$ だけ収縮することになる。

この $0.2\epsilon_x l$ に相当する板厚の変化は、各部の応力に依存した板表面の凹凸分布として現れるので、光干渉などを用いてこれらの凹凸分布を測定すれば、定性的な残留応力分布を知ることができる。

なお、この表面に生じる凹凸は、次に示すように z 方向の残留応力の影響も同時にうけるので、これらの影

響を小さくしたい場合は、板を薄く切断して z 方向の応力を解放したのち焼鈍すればよい。

2) 応力焼鈍変形に対する z 方向応力の効果

Fig. 2-(b) の z 方向に (3) のような残留応力をもつ溶接板を想定し、その上端の薄層 (1) に加わっている力を考える。

この薄層との界面 (2) には矢印のような力が下方から作用しているが、これは (a) のようなはりに作用する 3 点曲げの力と同様に考えることができる。

このようなはりに力を作用させた状態で応力焼鈍した場合、(A) はりの中央部が降伏するため、一層下方にたわむ。(B) はりがたわむ前に下方に引張っている力 F (溶接部の残留応力) が解放されるため、はりの中央部が上方にもどる。この 2 つが考えられる。このうちどちらの効果が大きいかによって xy 平面上での凹凸が定まるが、これまでの結果からは、(A) の効果の方が強く現れ、 xy 方向に残留応力がある場合と同様に、 z 方向に引張られている場合の上部切断面は「凹」になり、 z 方向

Fig. 2 Explanation of changing process on surface relief by stress release in welded plate.

(a) Similarity to bending of a beam.

(b) Change of surface relief due to cutting perpendicular to z -direction and annealing.

(c) Change of surface relief due to cutting in thin plate and annealing.

より圧縮力を受けている場合は「凸」になることが確かめられている。

2.3 Z 方向の残留応力分布の観察

Fig. 2-(b) の z 方向に (3) のような残留応力をもつ溶接板を (5) の線にそって切断した場合、その切断面には残留応力によって図のような凹凸のすき間が生じる。

このときの溶接金属上の z 方向の応力分布は (6) に示すように、切断面近傍だけ応力が解放されてほぼ 0 となる。この z 方向の応力が (a) の下方への力 F として作用しているのであるが、次に (5) から少し離れた (4) あるいは (4)' の線にそって薄片に切断し、力 F の作用を切り離してみる。すると (c) のように (5) の切断面付近に作用していた応力が解放され、(5) の切断面のすき間は小さくなるはずである。

以上のことから、あらかじめ (5) の切断面を精密に平面ラップ仕上げしたのち (4)' を切断して薄片に作用している力を解放すると (5) の仕上面上には再び z 方向の残留応力分布に依存した凹凸が生じる。

この凹凸分布をあとに示すように光干渉を利用して写真にとれば、xy 平面上での z 方向の定性的な応力分布を知ることができる。

2.4 塑性変形分布の観察

これと類似の方法はすでに切欠先端の塑性変形分布についての、Oppel ら^{1,2)} などの光干渉法による測定が行われている。さて、Fig. 1-(a) の切欠部に弾性限内の応力を加えると、その応力分布に比例した凹凸が表面に現れるが、除荷すれば当然ながら消える。しかし、切欠先端部にわずかも塑性変形が生じた場合は、除荷後もその塑性変形量に比例した凹凸が残るから、その凹凸分布を調べ、作図による勾配の変曲点をとることによって切欠先端部の塑性変形範囲を知ることができる。

3. 干渉縞の撮影方法

3.1 ナトリウム光による写真撮影法

Fig. 3 に示すように表面に凹凸をもつ試料の上にオプチカルフラットガラスをのせ、コンデンサーレンズを通した白色光またはナトリウムなどの単色光を当てて写真にとる。

本実験では主にナトリウム光を光源としているので、各干渉縞の間隔は、 $\lambda/2 = 0.295 \mu\text{m}$ の高さ変化を表わしている。なお、干渉顕微鏡を用いれば、極微小部分の観察も可能となるが、半径 0.1~0.2 mm 程度の範囲のひずみ分布ならばあとの Fig. 7 に示すようにカメラのみによる接写も可能である。

3.2 低温変形挙動の直接撮影法

Fig. 3 の点線に示すチャンバーの中を低温にすると

Fig. 3 Method of photographing by a sodium lamp.

Fig. 4 Method of photographing by a laser.

もに真空または乾燥ガスを満たし、その中で曲げ応力などを加えて直接写真にとれば、ぜい性破壊試験など低温での変形挙動を知ることができる。

3.3 応力焼鈍過程の直接撮影法

焼鈍による応力緩和過程の動的な変化を知るためには、試料を焼鈍温度に保ったまま光干渉測定をしなければならない。このような高温中では、たとえば水晶製のオプチカルフラットガラスを用いたとしても、試料との間に拡散がおり接着する可能性がある。そのため Fig. 4 のように真空または不活性ガス中で加熱された試料に He-Ne ガスレーザー光を当てれば、非接触状態で写真がとれる。

4. 各種観察法の適用例

4.1 切欠材の応力、残留応力の分布および塑性変形の分布

1) 弾性応力および残留応力の分布

Fig. 5-(a) に示す形状の試料表面を平滑にラップ仕上げたのち、これに図 (b) のような力を加えたまま試料上端を溶接してノッチ付近のひずみを固定する。このとき試料表面には弾性応力による凹凸が生ずるが、これにナトリウム光を当てるとその凹凸を表わす縞模様が見れ

る。この縞模様は定性的には切欠部の応力分布を等高線として表わしているので、この等高線に直交していくつかのひずみゲージをはることができれば、これらの応力分布の定量化も可能となる。

次にこの表面を再びラップ仕上して表面の凹凸を除くと(c)のようになるが、この切欠部先端にはもちろん(b)の等高線で示す弾性応力が残留している。この(c)の試料を真空中で600℃、2時間応力焼鈍すると(d)のように再び(b)と類似の等高線が現れるので、切欠部先端の残留応力分布を知ることができる。

なお、引張応力およびその焼鈍によって生じた(b)および(d)の等高線はいずれもノッチ先端部がひっ込んでいるが、これを調べるためには試料上のオプティカルフラットガラスを押し、そのときにピークの輪が広がるか(凸)つぼまるか(凹)によって簡単に判別できる。

2) 塑性変形分布

Fig. 6-(a)は軟鋼のスリット切欠シャルピー試験片に静的曲げ荷重を加えて、切欠先端(半径0.4R)に種々のひずみを与えた場合、(b)はそれを除荷した場合の縞模様を示した。あまり応力集中が認められないような小荷重下でも、それを除荷すると切欠先端にはわずかながら縞模様がのこり、この部分が塑性変形したことが知られる。Fig. 7は同じく-144℃の低温でぜい性破壊をおこす直前まで変形させたのち除荷したもので、このような低温においてもノッチ先端(半径0.1R)には塑性変形が観察された。

4.2 溶接部の残留応力分布

1) 切断によるz方向の応力解放

Fig. 8に示す片側開先のT形すみ肉溶接部を例として、残留応力分布を調べる過程をのべる。まず(A)に示すように被観察面をラップ仕上したのち、その面を薄く切り離して(3~5mm)z方向の応力を解放する。これによって生じた表面の凹凸を撮影した干渉縞の写真を右端に示した。

すなわち、溶接金属部で引張、その周囲の母材部で圧縮の単純な応力分布となっている(この切断法のみ凸で引張、凹で圧縮を表す)。一般にこのような弾性体中の微小部に急な応力勾配が存在した場合は、その周囲

Fig. 5 Process of measuring elastic and/or residual stress distribution in notched plate.

Fig. 6 Distribution of plastic deformation in the vicinity of notch-tip.

Fig. 7 Plastic deformation produced at a notch-tip under subzero temperature (-144°C, unloading).

を切断しても応力はあまり解放されない。したがってひずみ解放による凹凸も板表面には現れにくいので、実際

Fig. 8 Observation process of residual stress distribution in welds

より、やや単純な残留応力分布を示すことになる。

2) 焼鈍による xy 方向の応力解放

Fig. 8-(B) のようにあらかじめ薄片 (3~5 mm) に切断して z 方向の応力を解放したのちその切断面をラップ仕上し、600℃ で 2 時間応力焼鈍する。薄片の厚みが十分にうすい場合は主に xy 方向の残留応力の解放によって板表面に凹凸が生じるので、この 2 方向のみによる応力分布状態を知ることができる。

同じく右端の写真をみると、z 方向がすでに解放されているため、全体としては xy 方向の解放による比較的ゆるやかな勾配となっている。しかしこの焼鈍法によれば、先の切断法であらわれにくかった HAZ 部の外側に急な応力勾配が生じているのがわかる。なお、拘束用として 1 パス溶接したのちその反対側 (写真の右側) に 2 パス溶接した場合、拘束用ビード側では HAZ 部の熱応力がそのまま残っているのに対し右側の 2 パス溶接部には比較的単純な等高線があらわれており、冷却途上において HAZ 部等が大きな熱収縮変形を受けたことを示している。

3) 焼鈍による xyz 方向の応力解放

試料を厚く (20~30 mm) 切断し、2) と同様に表面をラップ仕上したのち応力焼鈍する。この焼鈍によって xyz の全ての方向の残留応力が解放されるので、これら 3 方向の応力解放による体積の変化が、応力分布に依存した表面の凹凸として現れる。この場合上段の z 方向および中段の xy 方向の等高線を合成したかたちになっているが、z および xy 方向のみの応力解放のときには現れていなかった HAZ 部境界の微小な応力変化などもよ

く現れており検出感度は最も高い。

以下 3) の方法の適用例を 2, 3 挙げる。

Fig. 9 は T 型すみ肉溶接部を強制的に塑性変形させたのち焼鈍したものである。溶接のままの (a) と比べると応力勾配がゆるやかになっており、塑性変形による局部応力の緩和が認められる。

Fig. 10 は高張力鋼の y 開先拘束試験片を、125℃ および 450℃ で予熱溶接して焼鈍したものである。450℃ に予熱したものは 125℃ 予熱に比べて HAZ 部近傍の応力状態がかなりゆるやかになっている。

Fig. 9 Stress release by plastic deformation.

(a) as-welded (b) after plastic deformation

Fig. 10 Effect of preheating on residual stress distribution of welds.

(a) 125°C preheat (b) 450°C preheat

Fig. 11 Stress concentration at a crack arrest point.

Fig. 12 Other examples of testing.

(a) Welding spatter ($\times 2$)

(b) Rolled round bar ($\times 1/2.5$)

Fig. 11 には Fig. 8 と同じ形状の試験片の拘束溶接のルート部にクラックが発生した場合の残留応力分布を示した。クラック停止端には新しい応力集中が生じていることが分る。

これらのほか、アークストライク、スパッタ、ポンチ孔などの付近や、圧延材内部の残留応力分布、切削加工面の弾性あるいは塑性変形域の測定例がある。Fig. 12 にスパッタ (a) および圧延丸棒 (b) 中の残留応力分布の一例を示した。

4.3 焼鈍による応力緩和過程の動的測定

Fig. 13 は高張力鋼を応力除去焼鈍のための昇温過程中的変化を Fig. 4 のレーザー光を使った方法で調べたものである。19分かけて142℃まで昇温しただけで、すでに HAZ 部にそった変形がみられ応力の解放が生じている。

4.4 溶接部の強制曲げによる弾性および塑性ひずみ分布

表面をラップ仕上げした T 型すみ肉溶接試験片を Fig. 14 のように強制的に曲げ、そのときの弾性および塑性ひずみ分布などを、表面の凹凸を観察することによって知ることができる。(a) は強制曲げによって生じたひずみ分布を示し、(b) は力を除荷したあとに残った塑性域を示している。負荷-除荷をくり返しながら荷重を大き

Fig. 13 Dynamic observation of stress-release process observed by a laser method.

stress

10kg/mm²

24kg/mm²

36kg/mm²

46kg/mm²

54kg/mm²

(a) loading

(b) unloading

Fig. 14 Plastic deformation at a toe of a fillet weld by bending load.

くしていくと、どのような場所から塑性変形が生じ、それがどのように拡がっていくかがわかる。

5. 考 察

以上、光干渉を用いた簡単な観察法によって切欠材および溶接部の定性的な応力、残留応力ならびに塑性ひずみの分布を知ることが可能なことを示した。ただこのような方法で観察した応力やひずみの分布を定量化するためにはいろいろ問題があるが、均質材の応力分布については形状が特に単純である場合には計算を併用して定量化が可能と思われる。また、形状が単純で同一の試料が2個以上あり、かつその応力勾配があまり急でない場合は、他の1枚に等高線に直角に貼った数枚のひずみゲージの値を用いて応力分布を定量化することも考えられる。

一方、焼鈍法による残留応力の観察は定量化がきわめて困難である。その理由の一つとしては、一般に焼鈍によって応力が除去される過程、すなわち厚肉物体の中心部の応力緩和などがどのようにして行われるのか、現在までのところはっきりしていないことがあげられる。

厚肉体の中心部に引張力が作用しているものを応力焼鈍した場合、その応力が緩和されるためには表面層の原子が順次中心部に移動するか、高温クリープのように転位の上昇や空孔の移動などによって粒界などに空洞が生じて応力が緩和されるなど種々の現象が考えられる。このどちらが多く生ずるかによって応力焼鈍した場合の表面の凹凸の状態が変化するので、これらの現象が定量化されないかぎり、焼鈍法による残留応力分布の定量化もあり得ない。

この方法による溶接部の残留応力測定については、そのほかいくつかの問題点があると思われる。たとえば溶接部の組織が異なるなどの材質の不均一性や溶接部の凝固方向に依存する異方性、冷却途上に応力集中などに

よって塑性変形した部分の再結晶速度またはクリープ速度の増加、その他結晶の粗大化などによっても特異な応力緩和が生ずる可能性がある。しかしながら、現在までのところ結晶粒の大小や塑性変形の程度などに起因すると思われるような干渉縞の明瞭な変化は確認されてなく、これまでの測定結果も次報で述べるように実際の溶接割れともよく対応していることから、定性的な応力分布観察法としては十分利用できるものと思われる。

6. 結 論

鋼などにひずみを加えたとき、あるいは応力除去焼鈍によって生じる板表面の凹凸の変化を観察するという新しい方法によって以下の観察が行えることがわかった。

- 1) 表面をラップ仕上しておくだけで、応力集中部の位置、塑性変形領域などを簡単に知ることができる。
- 2) 試料の残留応力の解放の方法を変えることによって z 方向、 xy 方向および xyz 方向の応力解放による形状変化を知ることができる。
- 3) 本法は低温域ならびにレーザー光を用いることによって高温域での応力分布状態を知ることができる。

終りに本実験を行うに当っては、日揮 K. K. 横井貞樹、船舶技術研究所西川和美、当時東京工業大学生伊藤正敏、小石忠嗣、永島義弘の諸氏の協力を得た。ここに厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) G. P. Oppel and P. W. Hill: "Strain Measurements at the Root of Cracks and Notches", *Experimental Mechanics*, 4-7 (1964), pp. 206-211.
- 2) J. H. Underwood and D. P. Kendall: "Measurement of Microscopic Plastic-strain Distributions in the Region of a Crack Tip", *Experimental Mechanics*, 9-7 (1969), pp. 296-304.