FC 25 鑄鉄の振動による表面残留応力除去の挙動*

中 桐 明 和**, 前 田 春 興**, 喜 多 実***

The Behaviour of Vibrational Surface Residual Stress Relief
in FC 25 Cast Ironby Akikazu NAKAGIRI,
Haruoki MAEDA, and Minoru KITA

The relief of surface residual stress in a FC25 Pearlitic Graphite Cast Iron plate has been experimentally studied using a large laboratory shaker. When the vibratory stress amplitude added to the residual stress is more than 0.02% offset stress in the materials, more residual stress is relieved. When the value is smaller than the added value, residual stress is not relieved. Unequally distributed residual stress throughout the specimen can be relieved through vibration. This is accomplished by changing the point at which the materials are held in the vibration equipment. By determining the number of vibration cycles and the stress amplitude, fatigue damage on the materials can be prevented under certain conditions. After exposing the materials to vibratory stress, remarkable change in residual stress was not observed after exposure in open air for one month.

Key Words: Material Testing, Fatigue, Vibration, X-Ray Stress Analysis, Residual Stress Relief

1. 緒 言

残留応力は金属の製造、加工および構造物などの製造、鍛造、溶接および組立、使用時に発生する不可避的な問題である。これは材料の機械的性質に影響を与え、製品の寸法変化をきたしたり、機械の精度を悪くしたり、さらには破壊の原因となったりする。これらの悪影響を除くためには有害な残留応力を除去したり有害ではないように安定化させたりする必要がある。

残留応力の除去には、主として焼なましやシーズニングなどによる場合が多い。しかし、それらは設備の大形化、時間の長期化などの問題があり、経費と時間が大である。最近の機械類の大形化や複雑化に伴い、作業能率の低下や生産性の低下を招き、また省エネルギー面からも問題がでてきた。

振動による残留応力の除去は VSR と呼ばれ最近では各国で注目されている。これは鋳物を高所から砂上に落下させると以後の変形が少ない。また鉄道線路の

そばでのシーズニングは効果がある⁽¹⁾。などという事実に基づいてドイツで研究がなされ⁽²⁾、ヨーロッパ⁽³⁾⁽⁴⁾、アメリカ⁽⁵⁾、ソ連⁽⁶⁾に広まった。我が国においても紹介と報告がなされている⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。これらは、振動による残留応力除去を機械加工前に適用して有害な残留応力除去を行うと機械加工による寸法精度の狂いが生じないことを重点においている。しかしながら、明確な振動処理条件での効果が明らかにされないまま論議されたため、効果が少ない、および疲労破壊などにもつながるとして VSR の有用性について疑問的な記事があり、我が国のものにも見られる。

本研究は振動処理条件を明確にし、その処理過程での残留応力の挙動を把握し、そのメカニズムを明らかにしようとするものである。そのためには、振動を与える加振機に能力が大きく精密な制御ができるものを使い、さらに残留応力の測定に細心の注意を払って X 線で測定し、良好な結果を得た。

残留応力の振動による除去の研究が定量的に確立し、その挙動と効果が明確になると、現今いわれている省エネルギー化にも非常に貢献するものと期待される。

* 昭和 58 年 11 月 28 日 第 923 回講演会において講演、原稿受付 昭和 58 年 5 月 25 日。

** 正員、関西大学工学部 (〒564 吹田市山手町)。

*** 正員(株)日立製作所豊川工場 (〒442 豊川市白鳥町)。

2. 実験方法

2.1 実験材料 使用した材料はパーライト系片状黒鉛鋳鉄の FC25 であり、その化学成分値を表 1 に示す。また、その組織は光学顕微鏡によりパーライト系片状黒鉛鋳鉄であることを確かめた。この FC 25 を図 1 の形状と寸法に鋳込んで試験片とした。

試験片の表面は溶接予定箇所の裏面で、その面を #600 までエメリー紙仕上げ後、853 K で 2 時間真空焼なましした。試料の機械的性質を表 2 に示す。0.02 % オフセット応力はほぼ弾性限に相当する応力と考えられる。試験片の X 線応力測定箇所の電解研磨は理学電機(株)製電解研磨 E 液を使用した。

2.2 残留応力の発生 材料に残留応力を発生させるには加熱冷却による方法、機械的な方法および溶接による方法があり、いずれも検討したが、溶接による方法を選んだ。それには鋳物用溶接棒を用い試験片に点状のアーク溶接ビードを 3～5 秒間与え、また一部の試験片には線状のアーク溶接ビードを与え、その裏面の引張り残留応力を測定の対象にした。点状アーク溶接の位置は図 1 に示す。また、その裏面の残留応力の分布を図 2 に示す。図は試験片の軸方向に軸方向残留応力分布を調べた図である。さらに、予備実験として振動処理による残留応力の分布の変化も検討した。図中の白丸は振動処理前の残留応力の値であり、黒丸は振動処理後の残留応力の値である。振動処理により残留応力の絶対値は低くなり分布が均一化される。

表 1 供試材料の化学成分 (wt %)

C	Si	Mn	P	S
3.58	2.10	0.40	0.151	0.210

表 2 供試材料の機械的性質

Elastic modulus	110 GPa
Tensile strength	385 MPa
0.2% offset stress	340 MPa
0.02% offset stress	170 MPa

図 1 試験片の形状と寸法およびアーク溶接点状ビードとストレイン・ゲージの貼付位置

2.3 X 線応力の測定 FC 25 鋳鉄は結晶粒も大きく、その上に黒鉛を含んでいて、X 線応力測定が困難な材料の一つである。使用した測定器は理学電機(株)製平行ビーム型 X 線応力測定装置である。その X 線応力測定条件を表 3 に示す。

本測定法は回折強度曲線よりピーク角度を求める方法であるが、大きな残留応力のために $K\alpha_1$ 線と $K\alpha_2$ 線が重複して現れ、ピーク角度の正確な値を求めることが困難である。これを防ぐには 1/8 価幅法などがある⁽¹⁾。本実験では 1/4 価幅法でピーク角度を求め、 $K\alpha_2$ 線による影響を少なくするようにと配慮した。つぎに、問題となったのは、 $2\theta - \sin^2 \psi$ 線図の高入射角度域における各点のばらつきである。この問題を考えるために入射角度を $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 27^\circ, 33^\circ, 37^\circ, 40^\circ$ および 45° と細かく変化させて回折強度曲線を描きピーク角度を求めた。その結果、 $2\theta - \sin^2 \psi$ 線図の回帰直線が 0° から 33° までは直線の上に乗るが 37° 以上でばらつきが見られた。この原因としては回折強度最大位置での反射 X 線のカウント数を比較すると、 37° 以上の高入射角度域では 0° のカウント数の 1/3 以下となっていた。それゆえに、精度よく回折強度曲線のピーク角度を求めるために、X 線入射角度を $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 35^\circ$ の 4 点とすることにした。

$2\theta - \sin^2 \psi$ 法による定数 K は X 線による応力とストレインゲージによる応力を対比させて決定した。4

表 3 X 線応力測定条件

Measuring apparatus	Parallel beam type X-ray stress analyzer with PC counter tube
Characteristic X-ray	Cr-K α
Filter	V
Beam area	5×5 mm ²
Tube voltage	30 kV
Tube current	20 mA
Time constant	8 sec

図 2 アーク溶接点状ビードによる残留応力の分布

点曲げ装置によって X 線による応力値はストレングスによる応力値の 0.295 倍となった。これは鋳鉄の結晶粒が粗大でかつ黒鉛を含むためである。材料試験から得た縦弾性係数 110 GPa, ポアソン比 0.26 および無ひずみ状態の回折角 156.68° より K' は -154 MPa/deg となる。そこで、本研究では先の 0.295 の逆数を K' の値に掛け K 値として -521 MPa/deg を採用した。

以上のような注意を払った結果その信頼限界値を計算すると⁽¹¹⁾, 68.3%信頼限界値は 3.3 MPa, 95%信頼限界値は 13.8 MPa となった。

2・4 振動処理 試験片に振動を与える装置は、試験片の一次共振振動数および三次共振振動数が与えられて、しかも安定した大きな加振力が得られるものでなければならない。加振機は国際機械振動研究所の VS-3202 C 型で最大加振力 800 N, 最大加速度 4.5 m/s^2 , 最大変位 25 mmp-p および周波数範囲 5 ~ 5,000 Hz を使用し、これらの制御には明石製作所製振動分析器 AVA-IV を使用した。それらの概略図を図 3 (a) に示す。また同時に試験片の受ける一次の応力振幅波形と三次の応力振幅波形も図の (b) に示した。本装置では出力 1.0 (A) の場合、一次共振の周波数は 153 Hz, ひずみ振幅は 700×10^{-6} である。他方、三次共振の周波数は 970 Hz, ひずみ振幅は 100×10^{-6} であり、一次の値に比してほぼ 1/7 と極めて小さくなる。

3. 実験結果および考察

3・1 振動繰返し数による残留応力の変化 残留応力の振動繰返し数による影響を調べた結果を図 4 に

図 3 振動試験装置 (a) と応力振幅波形 (b)

示す。図より初期残留応力 σ_R は振動繰返し数とともにほぼ直線的に減少し、ある回数以後は定常状態となる。ひずみ振幅 ϵ_a が 1000×10^{-6} 程度までは $10^4 \sim 10^5$ 回で定常状態に達する。したがって、以後の振動繰返し数は 5×10^4 回を基準に選んで実験を進めた。

3・2 応力振幅と残留応力の関係 点状アーク溶接によって試験片中に生じた残留応力を種々のひずみ振幅で振動処理した結果を図 5 に示す。本実験はひずみ振幅一定で行ったので振動処理の始めと終りでは応力振幅に換算した値が残留応力の変化により異なる。そこで振動処理最終状態のひずみ振幅を応力振幅に換算し残留応力との関係を図 5 に示した。図中白丸は振動処理前の残留応力を表し、黒丸は振動処理後の残留応力を表し、その変化を矢印 $\rightarrow$ で表した。また二重丸は振動処理を行っても残留応力の変化がなかったことを示す。図から振動処理後の残留応力 σ_{RA} と応力振幅 σ_v の回帰直線を求めると

$$\sigma_v = -1.09\sigma_{RA} + 174 \quad (1)$$

が得られる。これより応力振幅と残留応力の除去後の値の和が、ほぼ 0.02% オフセット応力の 170 MPa となると考える。したがって、次式が与えられる。

$$\sigma_R + \sigma_v = 170 \quad (2)$$

すなわち、(1) 残留応力 σ_R と応力振幅 σ_v の和が 0.02% オフセット応力の 170 MPa を越える場合、その越えた残留応力の値は振動処理によって除去される。(2) 残留応力 σ_R と応力振幅 σ_v の和が 170 MPa を越えない場合は、残留応力は除去されない。

これらは Peiter⁽³⁾, Wozney-Crawmer⁽⁵⁾ および Lubahn-Felgar⁽¹²⁾ らの報告と同様な結果であるが、本実験ではさらに種々の角度から多くの実験を行い、振動による残留応力の除去を確かめた。

つぎに、残留応力の緩和率 η を次式で定義し応力振幅との関係を調べた。その結果を図 6 に示す。

$$\eta = \frac{\sigma_{RB} - \sigma_{RA}}{\sigma_{RB}} \quad (3)$$

図 4 残留応力の振動繰返し数による減少

σ_{RB} : 振動処理前の残留応力, 図中に示した直線は式(1)と式(3)より得られる式(4)について振動処理前の残留応力 σ_{RB} をパラメータとして描いた。

$$\eta = \frac{\sigma_v}{1.09\sigma_{RB}} + \left(1 - \frac{174}{1.09\sigma_{RB}}\right) \dots\dots\dots (4)$$

これより緩和率を高くするには, 応力振幅を大きくすればよいことがわかる。また, 残留応力が零に近い試料でも応力振幅 174 MPa を与えられれば, 残留応力を零に出来る可能性も考えられる。

しかしながら, 応力振幅 174 MPa という大きな振幅を与えると破壊を起こす可能性がある。そこで, 応力振幅を段階的に上げていくを試みた。図 7 の 1 回めは応力振幅 60 MPa を与えたところ 161 MPa の残留応力が 107 MPa に減少し, 続いて応力振幅 120 MPa を与えたところ残留応力が 42 MPa に減少した。ここまでの緩和率は 0.74 である。しかし, 3 回めに応力振幅を 170 MPa まで上げたが, 振動開始後数秒で破断した。

以上の結果から, 残留応力と応力振幅の和が 170 MPa という式(2)の直線に沿って減少していくことがわかった。

3・3 残留応力が材料全体に分布する場合の除去法

これまでは残留応力は点状アーク溶接による局所的な存在であり, しかもその部分に応力振幅の最大値がくるような振動を与えた。実際の材料においては残留応力は材料全体にわたって存在する。ここではそのような場合における二例を考える。

第一の方法として, 試験片に線状溶接ビードを与え, 三次共振振動にて振動モードを変えて実験を行った。その結果を図 8 に示す。初め 5×10^4 回の振動では白丸の残留応力はその減少が見られなかった。つぎに 7×10^5 回の振動を与えると黒丸のところまで残留応力が減少した。これは残留応力と応力振幅の和が 170 MPa であることをほぼ満たす値である。そして, 残留応力は応力振幅が最大である測定点 3, すなわち, 加振点付近外の点で最小となった。しかし, 本装置では応力振幅が三次共振では 80 MPa と小さいので残留応力を小さな値に減少させることはできなかった。

第二の方法である加振点の位置を変えてやる方法を考える。前述の実験と同じく一次の共振を使用する。その方法と結果を図 9 に示す。試験片の左右の端から 50 mm の位置に加振機取付穴 A と B を設け, 溶接線を試験片の中央に 140 mm にわたって走らせた。まず加振点 A で初めの振動処理を行った。振動処理中の試

図 5 振動による残留応力の除去挙動

図 7 段階的な振動処理方法の図

図 6 残留応力の緩和率への応力振幅の影響

図 8 三次共振モードによる残留応力の除去例

試験片は片持ばりと同様な振動モードを示す。図中の白丸が振動前の値であり、半黒丸が振動後の値である。これは前述の一次共振で振動処理を行ったと同様な結果である。測定点1では残留応力が97 MPaに減少しているが、加振点から離れるにしたがって応力値が高くなっている。続いて、加振点をB点に移動させて振動処理を行った。その結果黒丸で示したように残留応力が減少し、試験片全体にわたってほぼ均一な残留応力の減少が見られた。

以上より、残留応力が材料全体に不均一に存在する場合には、加振点を移動させて振動処理を行うことが大変有効であることがわかった。ここでは、加振点を2箇所に移動させただけであるが、被処理材によっては数箇所に移動させて振動処理を行う必要がある。

3・4 振動処理と疲労破壊に関する一考察

これまで、残留応力、応力振幅および振動繰返し数が異なるさまざまな条件で振動処理を行ってきた。その間、試験片の破壊も時に見られた。また、FC 25 に 170 MPa という応力振幅は非常に大きく疲労破壊に結びつくことは当然考えられる。

そこで、残留応力の無い焼なましした試験片と、残留応力の存在する試験片とを比較し、また、他の結果とも比較した。それらを図 10 に示す。図中には実験に供したデータを振動繰返し数と応力振幅についてプロットしたものである。図中の添字は、振動処理前の残留応力の値を表している。残留応力 0 というのは焼なまし材についての結果である。また実線より下側の方の白丸は振動処理により、残留応力と応力振幅の和が 170 MPa であることを満たす残留応力に減少し破壊を起こさなかったことを表し、黒丸はその振動繰返し数の時、破壊を起こしたことを表す。そして実線は機

械設計便覧より抜粋した回転曲げ疲労試験による
 FC 25 鋳鉄の $S-N$ 曲線である⁽¹³⁾。この実線より上部
 の破線は焼鈍材の $S-N$ 曲線であり、実線より下部
 の破線は残留応力を有している材料の $S-N$ 曲線
 である。図からつぎのことが考えられる。

(1) 残留応力を小さい値に減少させるには応力振幅を大きくしなければならないが、振動繰返し数は少ない方がよい。

(2) 一次共振周波数は約 170 Hz と通常の疲労試験に比べて非常に高い。このような場合には、 $S-N$ 曲線は高繰返し数領域、すなわち図の右側へ移動すると考えられる。

(3) 図中の黒丸を結んだ線の下部の状態では疲労破壊を考えなくてよい。

(4) 残留応力は疲労限度を下げる。

以上のような結果から、残留応力除去のための振動処理条件の最適値は、残留応力の値にも多少影響されるが、図から応力振幅 100 MPa と振動繰返し数 5×10^6 の値を結んだ一点鎖線の下部にあると考えられる。本実験では振動による残留応力の除去法は疲労限の向上には役立たなかった。ゆえに、疲労限の向上を必要とする場合には他の方法を考える方がよいであろう。

3.5 振動処理後の日数経過による残留応力の変化

前述までの実験では残留応力が存在する試料に 170 MPa の応力振幅を加えれば残留応力が零になることがわかった。しかし、そのような大きな応力振幅を加えることは、装置の能力を考えても困難なことであり、また加えられたとしても疲労破壊が起こり得る。それゆえ残留応力が零にならなくても、可能な範囲内で残留応力を除去し、外部からの刺激に対して安定し

図 9 一次共振モードで加振点を変えた場合の残留応力の除去例

図 10 $S-N$ 曲線と破壊例

図 11 残留応力の日数による変化

ていば問題はないのである。

そこで、安定性を調べるために、気温の変化がある窓外に試験片を暴露して、自然枯らしのシーズニングを行い、振動処理 VSR 後の残留応力を 7 日ごとに測定した。また、それに加えて、いわゆる自然枯らしのシーズニング状態ならびに焼なましを行った試料の残留応力変化を同時に測定した。その結果を図 11 に示す。応力振幅 100 MPa 振動繰返し数 5×10^4 で振動処理を行った結果振動処理前に 123 MPa の残留応力が、65 MPa に減少した。その後のシーズニングによっても、ほぼ一定の安定した数値を示している。つぎに自然枯らしのシーズニングのみを行った試料は日数とともに残留応力が減少中であり、安定化するまではまだまだ長時間がかかると考えられる。その他、853 K で焼なましした試料は残留応力はほぼ零であり、当然変化は無い。

以上により、振動処理 VSR した試料は残留応力が零にならなくても、それなりに安定化しており、日数が経過した後の残留応力の変化が少ないことがわかる。

4. 結 言

以上の研究結果から、つぎの結論が得られた。

(1) 残留応力と応力振幅の和が 0.02 % オフセット応力の 170 MPa を越える場合、その越えた残留応力の値は振動処理によって除去される。

(2) 残留応力と応力振幅の和が 0.02 % オフセット応力の 170 MPa を越えない場合は残留応力は除去されない。

(3) 材料全体に連続的に不均一に存在している残留応力を減少させるには、一次共振で振動処理を行い加振点を移動させ、応力振幅最大点を移動させることが最も好ましい。

(4) 疲労破壊に対しては、S-N 曲線上で応力振幅 100 MPa、振動繰返し数 5×10^6 の点を結んだ線の下部の範囲を目安として振動を与えれば安全である。

(5) 振動処理後の残留応力の変化はほとんどない。

文 献

- (1) Dreger, D. R., *Machine Design*, 8 (1978), 100.
- (2) Bühler, V. H. und Pfalzgnaf, H. G., *Giesserei*, 16, Apr. (1964), 194.
- (3) Peiter, V. A., *Z. Metallkd.*, 51-1 (1966), 1.
- (4) Dawson, R. and Moffat, D. G., *Trans. ASME, J. Eng Mater Technol.* 102-2 (1980), 169.
- (5) Wozney, G. P., and Crawmer, G. R., *Weld. Research Suppl. Sept.* (1968), 411.
- (6) Зу́чЕнко о.и.,ほか 3 名, *Avtom. Svarba*, 9 (1974), 64.
- (7) 有井・ほか 3 名, *溶接技術*, 8 (昭 45), 105.
- (8) 中村・ほか 4 名, *材料加工*, 1-1 (昭 46), 39.
- (9) 吉田, *材料加工* 1, 2 (昭 46), 63.
- (10) 星川・山口, *溶接技術* 2 (昭 54), 20.
- (11) 材料学会編, *X 線応力測定法* (昭 56), 75, 80, 材料学会.
- (12) Lubahn, D. J. and Felgar, R. P., *Plasticity and Creep of Metals* (1961), 482, John Wiley and Sons, Inc.
- (13) 機械設計便覧編集委員会編, *機械設計便覧*, (昭 33), 462, 丸善.

討 論

〔質問〕 蒲 地 一 義〔近畿大学理工学部〕

質問者自身、振動応力除去法の研究を X 線的に実施した。メカニカルシールベアリングレース等円環状鋼製品に対して効果を認めたが、多くの場合についての効果の共通性が乏しく、そのままにして公表していない。

本論文で鋳鉄の残留応力除去を精力的に実験しておられる点、敬服するが次の点について意見を申し上げる。

この論文の主筋は、「鋳鉄の応力除去」が目的か、または「X 線で振動応力除去法を研究」されたのが主筋かということが一つの問題であって、多分鋳鉄の問題

があったからとは思いますが、振動による応力除去の研究には論文中に述べておられるように測定困難な材料を選ばれて苦労が多かったと思う。容易に測定できる材料から入るべきだと思う。

鋳鉄が主筋であるならば次のような運びとされるほうがよろしいかと思考する。すなわち、振動によって応力が除去される機構を考えてみると、フェライト中に固定されていた転位が振動のエネルギーによって解放されて塑性変形が起こるからであろうと推定される。そうすると、考察(1)に述べておられる大きい振幅で少ない振動数で応力に変化が生じた場合、正確な profile に変化が生ずるものと思う。このプロファイル変化を鋳鉄として考察していただければ十分なものと思う。

また結論では、鋳鉄については触れられず振動による除去効果のみ述べておられるが、鋳鉄としての何かがほしいと思う。鋳鉄を離れると、シーズニングの意味が全くなくなる。

種々意見申し述べたが、振動による応力除去はおもしろい問題であり、形状、物質、寸法の種々の場合についてご研究下さるようお願い申し上げる。

振動による場合、振動の腹と節では応力除去が異なるようである。特に構造の場合異なるようである。

〔回答〕 数々の貴重なご教示を頂き感謝する。以下、順に著者らの解を述べる。

ご指摘のように、本論文は鋳鉄の残留応力除去が主題である。10 年ほど前に鋼の塑性曲げによる残留応力

の振動による除去を研究したが、X 線応力測定値のばらつきが大きくて未発表となった。その後、3 年ほど休止後に、今回の鋳鉄を手がけた。成功した理由は、X 線応力測定時に高角度側でのカウント数低下に気づき $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 35^\circ$ の 4 点測定とし 1/4 価幅法としたこと、大きな残留応力値を溶接により導入したこと、および加振力の大きい振動装置を使ったことなどが成功の原因だと考えている。もちろん、今後は鋼などのほかの材料についても同様の効果が期待できるか検討を進めていく予定である。

振動による残留応力除去の機構の考察において、X 線の profile の変化として半価幅を検討してみたが、今回は明確な結論が得られなかった。過去、未発表であるが、黄鋼に超音波振動を与えた場合の転位の増減による回折線ピーク値の移動と半価幅の変化を検討し、有意性を得たことがある。これらを参考にしながら、今後ともに検討を続けたいと思っている。

振動の腹と節での応力除去の効果の差は本論文 3・3 節において検討した。ご指摘のとおりの結果である。すなわち、振動の腹と節とでは応力除去の太きさが異なるので、試銀保持の位置を数箇所移動させて、振動を与えてやれば平均的な除去効果を得ることができる。

今後は、ご教示のように、形状、材質、寸法の種々の場合、さらに衝撃による残留応力除去などについて研究していく予定である。