

残留応力の基礎

中代 雅士*

Masashi Nakashiro

1. はじめに

材料特性の中で一般にあまり知られていないものに残留応力がある。残留応力は、外観からは見えないものであり、認識されることが少ないが、工業界ではこの残留応力を積極的に利用しており、機械加工精度向上には残留応力の管理・把握が重要である。機器の損傷では、しばしばこの残留応力が損傷要因になっていることがあり、部材の健全性評価、余寿命診断を行う上でも残留応力の評価は必要不可欠なものである。

当社は、この残留応力の評価に深く関わっており、残留応力を計る計測装置 X Stress3000 の販売、本装置を使用した計測サービス、種々の破壊法による構造部材の残留応力計測、残留応力解析用の材料データ取得試験、物性値計測、数値解析による応力解析などを実施している。本稿では、この残留応力について簡単に計測原理・計測方法および最近の計測技術、今後の残留応力計測の市場性について紹介する。

2. 残留応力とは

機械の設計で設計者が構造部材の形状を考えると、材質や製作方法等を検討するが、その部材の作用力を考えることが重要である。この作用力は当然のことながら装置によって状況が異なる。

例として、航空機、自動車、鉄道車両などは運用中の中で、最大加速度が発生したとき（例えば、航空機であれば急旋回したとき、車両で言えば急ブレーキをかけた時などがそれに相当する）に発生する力 F について構造計算しておかねばならない。 F は次式で簡単に計算される。

（注記1）本来、加速度、力、応力はベクトル量であり、方向と大きさを持っている。応力の計測・解析にはこの方向と大きさが重要であるが、簡単に説明するために1次元を基本に表記する。材料評価には1次元で十分な精度が得られるが、設計など構造解析に利用する場合には厳密な3次元解析が必要である。

$$F = m (\text{質量}) \times \alpha (\text{加速度}) \quad (\text{式1})$$

一方、建築物など常態で不動のものは、加速度には地震発生時の最大振動加速度値が採用され、この数値は時代と共に変遷している。これは、地震が天災で複雑な動きをし、定量的な推定に基づく設定が難しいからであり、しばしば問題になる場合がある。2006年に問題になった構造計算偽装問題、最近では想定外の地震による柏崎原発でのトラブルなどが記憶に新しい。

次に、力 (F) が発生した時の個々の部材に作用する荷重を P (F) とし、物体断面積 A_0 に荷重 P が作用したときの応力 σ は次式で一般的に計算

* 計測事業部 技師長 工学博士 技術士（金属部門 総合技術監理部門）

される。

$$\sigma = P/A_0 \quad (\text{式 2})$$

この応力 σ の使用範囲が材料によって個々に定められている。構造物の設計には、応力値が許容値 σ_d 値以下に設計しなければならない。許容値は、メーカーの設計ノウハウとして管理されているもの、圧力容器などの設計基準として法律で決められているものなど種々様々である。

物体内に作用する応力には、前述の物体外部からの外力による外部応力 σ_{out} と、物体内部で発生している内力による内部応力 σ_{in} がある。この内部応力が残留応力とも呼ばれ、外力に関係なく材料自体が部材内部に保有、発生している応力である。この内部応力には、溶接、熱処理など熱による変形、材質変化（焼き入れなどの熱処理、浸炭、窒化などの表面処理）で発生する場合、機械的加工時（引き抜き、押し出し、圧延、矯正、切削、研削、ショットブラスト、ピーニング）に発生する場合、さらには使用環境下、経年によって発生・変化する場合もある。

物体の内部応力は、材料内部の材質均一性、形状、境界の拘束条件によって大きく影響を受け、複雑な応力分布をしている場合があり、その応力の大きさも材料の降伏点以上になる場合がある。そのために物体内部の応力を正確な評価する手法が多く研究者によって開発されて来た (Ref.1)。

物体に作用する応力を評価するには、この内部応力 σ_{in} と外部応力 σ_{out} の合計値 σ_t が重要であり、次式で表される。

$$\sigma_t = \sigma_{out} + \sigma_{in} \quad (\text{式 3})$$

一般には、引張応力を (+) 値、圧縮応力を (-) 値として扱い、合計値 σ_t が (+) の時は引張応力、(-) の時は圧縮応力になる。これらの値も当然 3次元のベクトル値であり、方向性と相互作用を

考慮する必要がある。

材料が破壊するときの破壊荷重 σ_f 、疲労損傷の応力振幅範囲 $\Delta\sigma$ 、クリープ損傷の応力 σ_c 、応力腐食割れ (SCC) の応力など、これら材料に負荷される応力の評価には応力の合計値 σ_t が評価の対象になる。

外力は、比較的分かり易く、計測方法も簡単である。例えば、当社では外力の与え方として錘、油圧シリンダー、ジャッキ、万能試験機、疲労試験機などを用いて外力を与え、外力は専用のロードセルで計測し、部材の変形、ひずみはひずみゲージ、ダイヤルゲージ、差動トランスなどの変位計等を用いて計測している。

一方、内力（残留応力）は部材内部の応力であり、通常は内部の部位に複雑に分布している。内部の応力分布を把握しておくことは非常に重要であり、しばしば、この内部応力が原因でいろんなトラブルが発生している。

例として図1に火力発電設備用主蒸気管のクリープ損傷事例を示す。この部材は火力発電設備製造者によって詳細な余寿命診断を実施し、残り35年以上の残存寿命があると判断したものである。皮肉なことに余寿命評価を学会に発表する数日前に蒸気漏洩事故を起こし、寿命評価技術に対する信頼性について物議をかもした例である。詳細に原因を究明した結果、プラント停止時に主蒸気管内面が急速に冷却される配管形状になっており、この冷却時に発生した残留応力が原因であった (Ref.2)。

ステンレス鋼は耐食性が優れた材料であるが、環境によって SCC の問題がよく発生する。図2は、溶接部の残留応力で SCC が発生した例であるが、このように溶接構造部材には、溶接部の残留応力が原因となる SCC に悩まされ、それを防止する施工法、材料改良などが開発されてきた。当社では損傷調査を実施しているが、このような

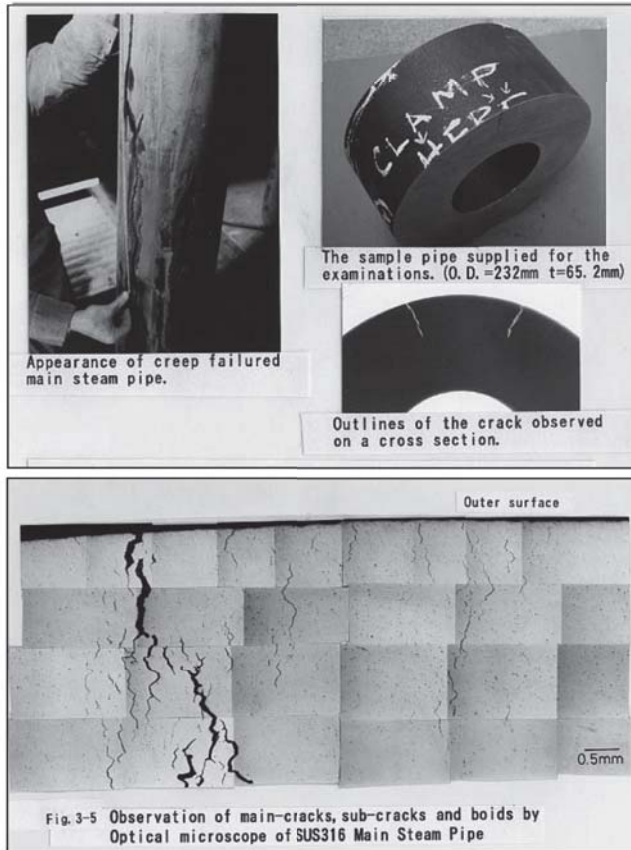


図1 火力発電プラント主蒸気管のリーク事故

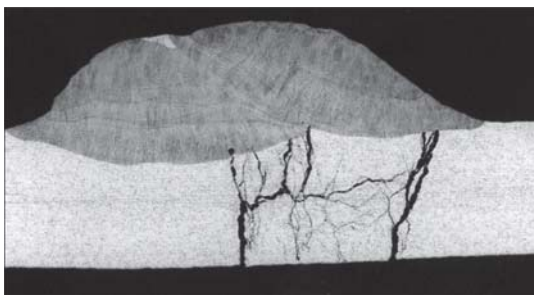


図2 溶接部の残留応力が原因で発生した
応力腐食割れ (SCC)

残留応力が原因による損傷事例は、枚挙にいとまがない。

3. 残留応力の利用方法

部材にかかる応力は(式3)で示される内部応力と外部応力の合計値が重要である。部材の負荷

を下げるためには、この応力 σ_t の数値を下げればよい。外部応力は使用条件で決定されるものであり、外部応力を下げるには(式2)において P は一定であるから、一般的に A_0 を大きくするしかない。 A_0 を大きくすれば、部材が重くなり、(式1)で質量 m が大きくなり、力 F が大きくなり、ひいては荷重 P が増加し、(式2)でさらに応力が高くなる悪循環に陥る。そこで、 σ_t を小さくするには、 $\sigma_{out} = -\sigma_{in}$ の関係が成立するような条件を材料自身に残留応力として持たせる、俗に言う下駄を履かせることになる。これが残留応力の積極的な使い方である。逆に、外力 0 でも σ_{in} が大きな値であれば、この残留応力自体で変形、破損する場合があります。応力除去焼鈍に代表されるような防止法も利用されている。以下に利用例を列挙する。

①残留応力の積極的利用

- ・バネ：コイルバネのように材料の応力使用領域が引張の場合、表面に圧縮の残留応力を入れて、応力使用範囲を拡大し、疲労寿命改善、軽量化が図られている。
- ・動力伝達シャフト（プロペラシャフト）：バネと同様、表面にショットピーニング、熱処理による軸表面に圧縮残留応力を入れ、表面の強度アップと、応力範囲を拡大し、疲労強度改善している。
- ・歯車：歯面表面に圧縮残留応力を熱処理で入れ、表面硬度アップと応力範囲の拡大を得ている。
- ・ボルト：ネジ底を転造により、圧縮残留応力を発生させ、ボルト締付時のネジ底強度を向上させている。
- ・タンク内面のショットピーニング：耐 SCC のために、タンク内面をショットピーニングで圧縮残留応力を入れている。

②残留応力の除去、または低減

- ・熱処理による熱応力除去：溶接部に発生した残留応力、圧延、引抜など加工の影響、鋳物で凝固時に発生した残留応力除去など、残留応力を低減させるために多様な方法が利用されている。熱処理には、ステンレス鋼の容体化処理、焼鈍、焼ならし、SR（応力除去焼鈍）等がある。
- ・加工方法の改善：加工時に残留応力が残らないように加工する方法で、切削の削り代制限、電解研磨法などが利用されている。

結論から言えば、金属材料の場合は、熱処理による改善が中心である。加工方法に関しては、加工メーカーのノウハウになっており、一般には公表されていない。特に自動車部品などの高精度でコ

ストダウンが要求されるものについては、旋盤の削り代、送り速度、バイトの交換頻度など詳細に決められており、細かく管理されている。

4. 残留応力の計測原理

残留応力値を正確に把握しておくことは品質管理上、安全対策、部品の長寿命化に重要であり、種々の残留応力計測法が開発され実用化されている。残留応力の測定法には、部材を小さく切断しながら応力を開放していくやり方、周囲にひずみゲージを貼り付けて中心に穴を開けるセンタードリル法等の破壊試験法と、材料の物性値が応力によって変化するのを利用して計測する非破壊検査法、さらに内部応力変化を数値解析でシミュレーションして内部応力分布を求める解析法があり、これらの手法を目的に応じて、単独または複合的に利用されている。

各計測手法は個々の特徴を持っており、それぞれの手法間で計測精度、力学的な応力特性、計測コストが大きく異なる。計測方法を選定するに当たり、個々の計測手法の特性、特長を熟知しておいてかつ、目的とする残留応力計測には、どの手法が最適であるかを選定する必要がある。

残留応力（応力）の計測は、変形・ひずみの計測である。万能試験機、疲労試験器、クリープ試験器などの材料試験で計測しているものは変形量であり、ダイヤルゲージ、作動トランス、ひずみゲージを貼り付けた伸び計などを使用している。この変形量 δ とひずみ ε の関係は（式4）で得られる。

$$\varepsilon = \delta / l_0 = \Delta l / l_0 = (l - l_0) / l_0 \quad (\text{式4})$$

ここで ε ：ひずみ、 δ 、 Δl ：変化量 l ；変形後の長さ、 l_0 ：変形前の長さである。

ひずみは無次元のベクトル量、変化量は長さの単位を持ったベクトル量である。変形には熱膨張

などの変化も含まれているが、ひずみは基本的に温度変動による変化量は含まれない。直接ひずみが計れるものにひずみゲージがある。ひずみゲージで計れる変化量は、ひずみ値であるが、必要に応じて温度補正する必要がある。

ひずみから応力に換算するには、ヤング率を用いて(式5)で応力に変換される。

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{式 } 5)$$

これは材料の弾性域内のフックの法則である。ひずみと応力の関係は基本的には弾性ひずみであることの確認が必要である。また応力は通常は単軸ではなく、3軸方向の成分を持っており、(式5)を一般式化すれば次式で与えられる。

$$\sigma_{ij} = \sum_{kl} C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad (\text{式 } 6)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \right) (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \right] \quad (\text{式 } 7)$$

一方、残留応力が発生する要因としては、局所的な塑性変形によることが多く、降伏点以上の残留応力を計測するには、ひずみ硬化則、塑性変形

理論など複雑な解析・評価が要求されるが、一般には次式で表される。

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (\text{式 } 8)$$

ここで ε_t : ひずみ ε_e ; 弾性ひずみ ε_p : 塑性ひずみ である。

応力は弾性ひずみで発生し、塑性ひずみは応力が発生しないとした場合には、 $\sigma = E \cdot \varepsilon_e$ 、 $\varepsilon_p = \varepsilon_t - \varepsilon_e = \varepsilon_t - \sigma / E$ が成り立つ。ひずみ計測、構造解析による評価では、これら複雑な解析式が必要であるが、物性値計測による評価では、外力と物性値の変化を把握(校正曲線)しておき、計測された変化量から校正曲線を用いて評価、計測する。

参考文献

- Ref.1) 須藤：残留応力とゆがみ、内田老鶴圃発行 1988
日本材料学会編：X線応力測定法 養賢堂 1990
- Ref.2) Delong, 木原、中代、石本、梶谷：火力原子力発電、Vol.35, No.3, p227



計測事業部
技師長 工学博士
技術士(金属部門 総合技術監理部門)

中代 雅士

TEL:045-784-6842
FAX:045-784-6826