

構造部材内部に閉じ込められた残留応力の計測技術

Measurement Technology for Residual Stresses Locked in Structural Members

中 代 雅 士 株式会社 IHI 検査計測 研究開発センター センター長 博士（工学） 技術士（総合技術監理部門，金属部門）
三 上 隆 男 株式会社 IHI 検査計測 技師長室 技師長 博士（工学） 技術士（機械部門）
松 田 昌 悟 株式会社 IHI 検査計測 計測事業部計測技術部 部長
三 谷 幸 寛 株式会社 IHI 検査計測 計測事業部材料試験部
高 久 泰 弘 株式会社 IHI 検査計測 計測事業部材料試験部

ショットピーニング，表面熱処理などで表面に大きな圧縮残留応力を内在させれば，高性能な材料強度特性をもち，部品の長寿命化，小型軽量化が可能になる．一方，溶接構造体で溶接時に引張残留応力を内在させれば，応力腐食割れ（SCC）や，疲労強度低下が原因となる損傷が発生する．このため，残留応力の正確な評価は重要課題であり，株式会社 IHI 検査計測（IIC）で実施している残留応力計測技術について紹介する．

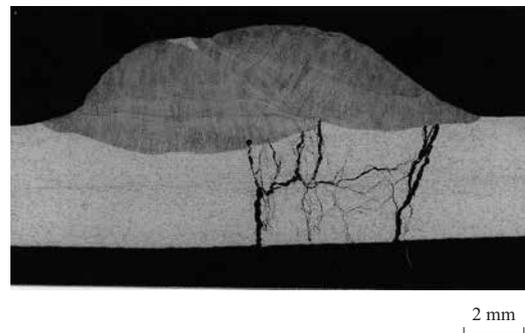
If large compressive residual stresses are produced on the surface of a structure by shot-peening, surface heat treatment, and so on, the material will have high structural strength, and it is this characteristic that enables downsizing and lightening of the structure. On the other hand, if tensile residual stresses are produced in a welded structure during the welding process, Stress Corrosion Cracking (SCC) or fatigue failure may occur. Accurate evaluation of residual stresses is therefore very important. This paper discusses the residual stress measurement technologies that are being used in IIC.

1. 緒 言

一般に機械構造部材に発生する応力は，外力からの外部応力と部材自体が製造過程，運用過程中に発生して閉じ込められた内部応力がある．一般的にはこの内部応力のことを残留応力と呼ぶ．材料力学的には，これら内外部応力を加算した応力値で評価される．物体内部に発生する残留応力は複雑な分布になっている場合が多く，的確に評価されることが要求される．残留応力の存在で，①部材の変形②応力腐食割れ（SCC）③遅れ破壊④疲労寿命低下⑤クリープ寿命低下，など種々の損傷要因となる場合がある．

第1図に溶接時の残留応力で発生した応力腐食割れ（SCC）の事例を示す．本事例のように，部材の残留応力を正確に把握することは，品質管理，寿命評価を行ううえで重要な課題である．近年は有限要素法（FEM）による解析技術が進歩しており，溶接構造体の溶接時の熱応力が発生する過程が弾塑性解析法によって精度良く解析評価されている．

しかし，解析結果の妥当性を評価するには，実体の応力計測による検証が必要であり，構造解析結果の妥当性を評



第1図 溶接時の残留応力で発生した応力腐食割れ（SCC）
Fig. 1 Stress corrosion crack (SCC) caused by residual stresses during the welding process

価するうえでも，部材の残留応力を計測する要求は高まっている．また，ショットピーニング，熱処理など応力解析が難しい処理に対しては，実測が有効である．残留応力は局部的に分布しており，計測方法と計測箇所との関係を把握しておかなければならない．そして，残留応力計測評価には，被試験体の計測目的，計測部位を明確にして，最適な手法で計測することが要求される．株式会社 IHI 検査計測（IIC）では，① X 線応力計測② 穿孔法③ DHD 法④ 切断法⑤ 構造解析法，などを担当業務として，残留応力計測・評価サービスを実施している．残留応力計測技術

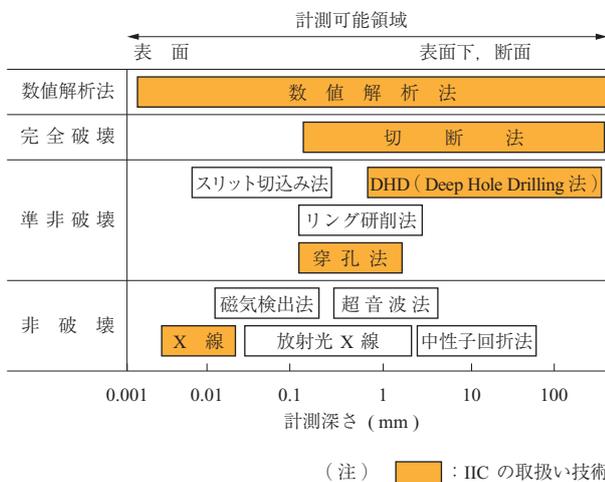
として要求されるほぼ全領域をカバーしている。

第2図に種々の残留応力計測法による計測可能領域を示す。これら計測技術のなかで、比較的安価で現場で簡易的に計測できる方法として X 線応力計測法と穿孔法について紹介する。

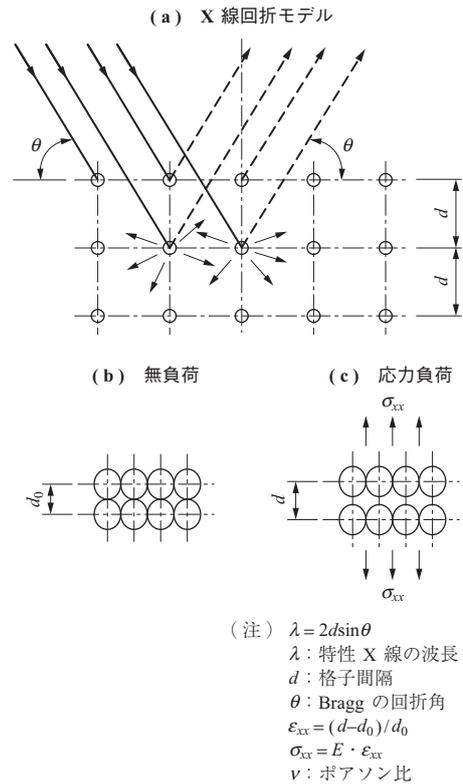
2. X 線応力計測法について

X 線による応力計測法は技術的に確立しており、公益社団法人日本材料学会で計測方法が標準化されている。特定の金属に電子線を当てると波長が一定な特性 X 線を含んだ X 線が発生する。この波長が既知の特性 X 線を供試体に当てれば、金属結晶格子間で回折現象（Bragg の回折線）が生じる。第3図に Bragg の X 線回折による X 線応力計測法の原理を示す。この回折角度 θ を求めれば、物質の原子格子間距離 d が求められる。材質の原子格子間距離は無負荷時では一定であるが、応力の負荷状況によってこの格子間距離が変化する。伸びていけば、引張応力が作用しており、縮んでいけば圧縮応力が作用している。X 線回折で格子間変化量とヤング率（弾性定数）（ E ）、ポアソン比（ ν ）で応力評価する。X 線で計測可能な範囲は供試体表面から 20 ~ 50 μm 程度の極表面の深さでの回折で、表面部の平均応力を計測している。また、X 線応力計測はすべての材料に適用できるわけではなく、以下のような制限がある。

- (1) 結晶粒が小さい多結晶体であること。
- (2) 粗大結晶粒や強い集合組織はないこと。
- (3) 複合組織ではないこと。
- (4) 計測部に急激な応力勾配がないこと。



第2図 種々の残留応力計測法による計測可能領域
Fig. 2 Various residual stress measurement methods



第3図 Bragg の X 線回折による X 線応力計測法の原理
Fig. 3 Measurement principle of X-ray diffraction method using Bragg's law

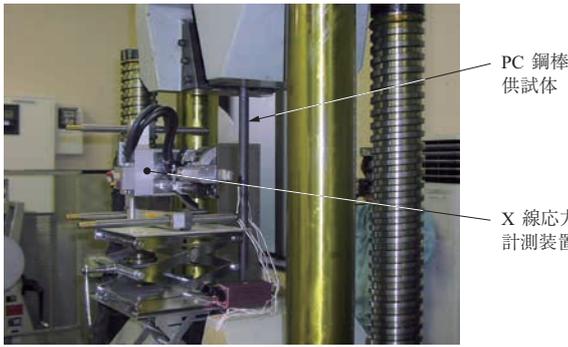
- (5) ヤング率、ポアソン比の物性値が既知であること。
- (6) 表面が平坦であること。

IIC では、第4図に示す携帯型 X 線応力計測装置 (X3000) を使用しており、現地計測にも積極的に利用している。

X 線応力計測方法の妥当性を検証するため、引張試験機に試験体を取り付けて外部応力と X 線応力計測値との相関関係を求めた。第5図に PC (Prestressed Concrete)



第4図 携帯型 X 線応力計測装置 (X3000)
Fig. 4 Portable X-ray stress measurement apparatus (X3000)



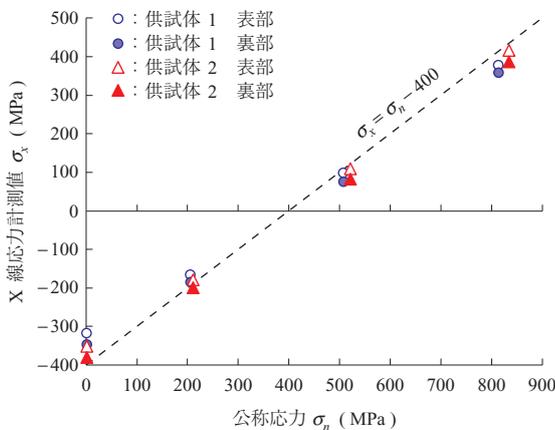
第 5 図 PC 鋼棒引張試験での引張試験機と X 線応力計測装置の応力計測状況

Fig. 5 Status of PC steel bar testing on a tensile machine and stress measurement by the X3000

鋼棒引張試験での引張試験機と X 線応力計測装置の応力計測状況を示し、第 6 図には PC 鋼棒の引張試験における公称応力と X 線応力計測値との関係を示す。本供試材は製造過程で積極的に部材表面に大きな圧縮残留応力を負荷した状況で使用されている。X 線応力計測結果では、初期値の圧縮応力から外部荷重による応力変化において直線関係が得られ、X 線応力計測方法が供試体表面の応力状況を精度良く計測できていることを示している。

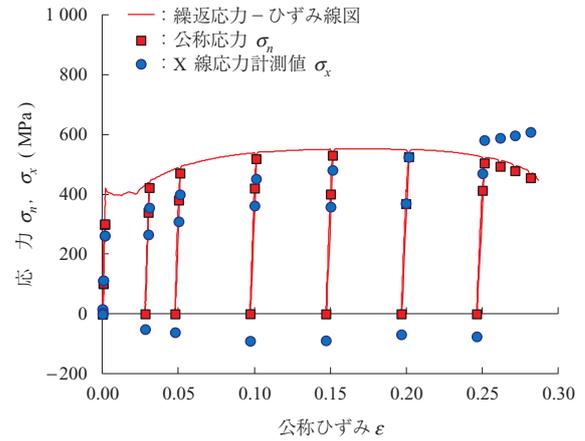
次に、溶接構造体として採用される SM490 材について、降伏点を越えた範囲の繰返荷重状況での荷重荷重と X 線応力計測値の関係を示す。各荷重荷重下での真応力 σ_r と X 線応力計測 σ_x との関係を示す。

真応力とは一般的に採用されている公称応力とは異なり、応力負荷時の実断面積で計算される値である。X 線応力計測値はこの真応力値と良い相関関係を示している。以上の結果から、X 線応力計測値は部材表面の弾塑性変



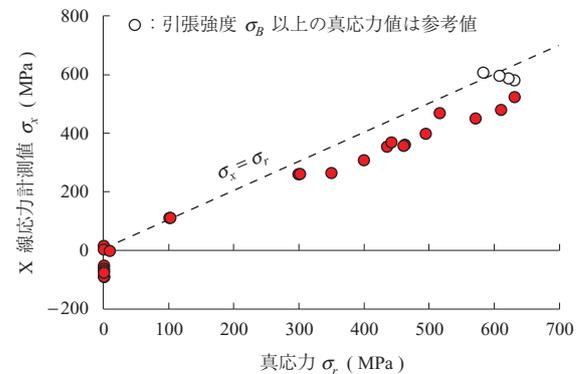
第 6 図 PC 鋼棒の引張試験における公称応力と X 線応力計測値との関係

Fig. 6 Relation between nominal stress and stress measured by the X3000 in the tensile test of a PC steel bar



第 7 図 繰返荷重荷重におけるひずみ ϵ と公称応力 σ_n 、X 線応力計測値 σ_x の関係

Fig. 7 Relation between strain (ϵ), nominal stress (σ_n) and stress measured by the X3000 (σ_x)



第 8 図 真応力 σ_r と X 線応力計測値 σ_x との関係

Fig. 8 Relation between true stress (σ_r) and stress measured by the X3000 (σ_x)

形とは無関係に、材料に負荷されている状況下の真の応力状態を計測していることを確認できた。

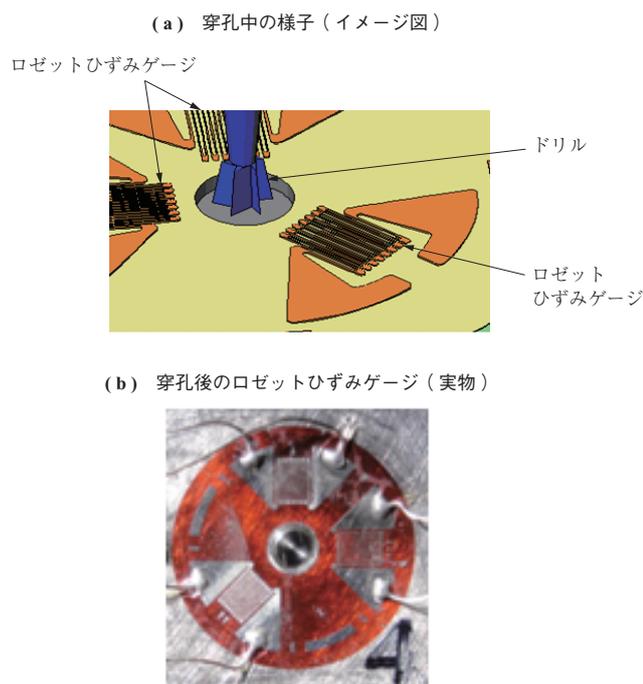
以上の実験結果から、X 線応力計測では、内部応力に限定するのではなく、部材の内外力を合計した応力が計測できるので、計測対象も従来の残留応力に特化した計測方法から、構造体の負荷応力状況（死荷重、静的荷重と呼ばれる）も計測できることが明らかになり、応力計測手法として計測対象を拡大していく。

3. 穿孔法について

IIC では溶接部位の残留応力計測に関しては、過去の実績と技術的信頼性が高いとして、切断法による計測方法を採用してきた。一方、穿孔法に関しては何回か技術的検討を重ねてきたが、精度良く穴をあける技術が確立しておらず採用してこなかった。イギリスの VEQTER 社（Bristol 大学）と共同で DHD 法（Deep Hole Drilling 法）を厚肉の压力容器に適用してきた経験から、穿孔による応力

計測は技術的に確立しており信頼性が高いと再認識し、DHD よりも簡便で、すでに欧米では広く用いられている穿孔法による残留応力計測技術を導入した。

穿孔法は、第 9 図に示すようなロゼットひずみゲージを計測部位に貼付後、ひずみゲージの中心部をエアタービンによって駆動されるドリルで段階的に穿孔する。その際に解放されるひずみを逐次計測し、二次元平面応力理論に基づいて穴の位置にもともと存在していた残留応力を解析する方法である。

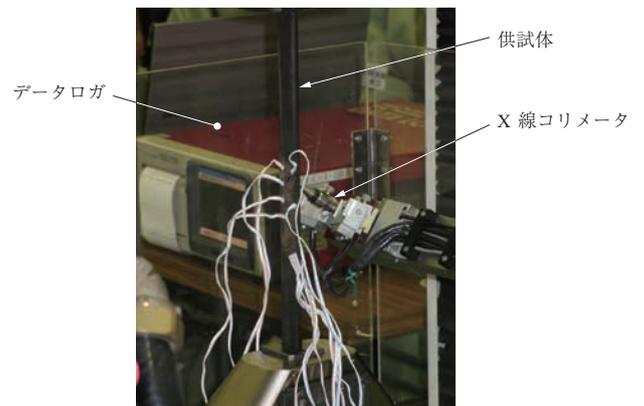


第 9 図 ロゼットひずみゲージ
Fig. 9 Rosette strain gage

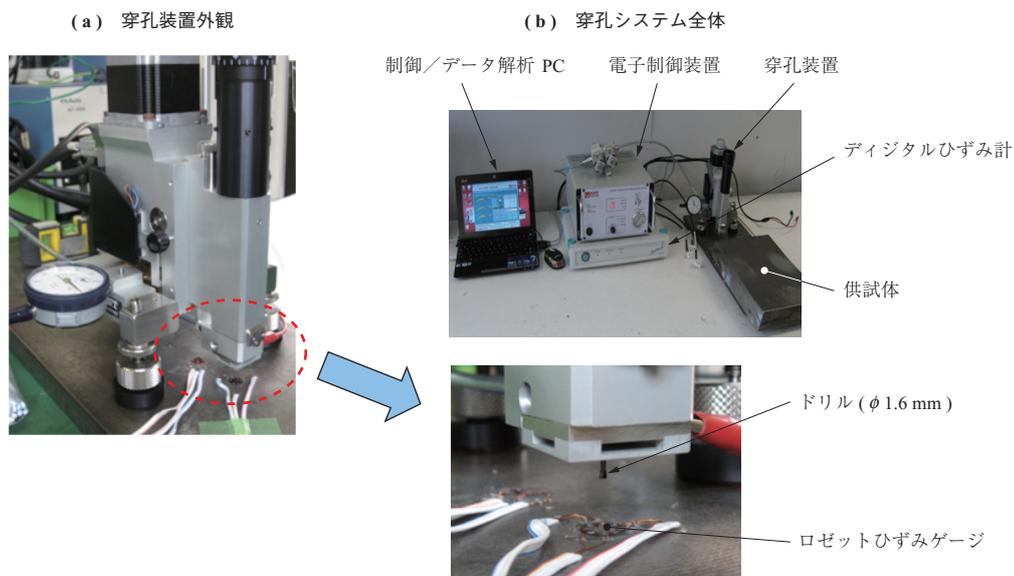
計測法は ASTM (American Society for Testing and Materials) 規格 E837-08 で詳細に規定されている。装置の外観を第 10 図に示す。供試体にロゼットひずみゲージ貼付け後、穿孔装置の顕微鏡を用いてドリル中心をひずみゲージ中心に位置決めすれば、後はパソコンによる全自動制御でドリル研削送り、研削後の解放ひずみ計測ができる装置である。計測されたひずみ、穿孔径の実測値、材料の機械的性質 (E , ν) などのデータを基に専用の解析ソフトを用いて解放された残留応力を解析する。

穿孔法と X 線法を比較するため、SM490 鋼薄板を対象として 1 軸引張試験を実施した。1 軸引張試験の状況を第 11 図に示す。この試験では、既知の負荷応力 (3 ケース) を与えて、両方法で計測した結果を比較した。

1 軸引張試験結果の比較を第 12 図に示す。両者ともに良い相関関係が得られた。穿孔法の特長は、穿孔する



第 11 図 1 軸引張試験の様子
Fig. 11 Status of the uniaxial tensile test



第 10 図 穿孔装置
Fig. 10 Appearance of the hole drilling system

