

残留応力の基礎（その3）

数値解析法による残留応力評価と 今後の残留応力技術動向の紹介

中代 雅士*

Masashi Nakashiro

1. はじめに

本誌 38号で残留応力の基礎を、39号では残留応力計測方法について紹介した。今回は最終回として数値解析法による残留応力評価手法の紹介、および今後の残留応力の技術動向について紹介する。

前回までは、残留応力は部材の強度特性に重要な役割をしているにもかかわらず、計測可能部位は限定される、X線などの電子線回折法以外の計測では破壊試験が主体であり、コストがかかるなど常時自由に評価、計測できるものではないことを紹介した。しかし、構造部材で残留応力を評価しなければならない場所は必ずしも測定可能場所とは限らない。また、装置の使用状況下での応力評価はひずみゲージなどの間接的な計測しかできない。これらの問題を解決する手法に構造解析によるシミュレーション法がある。残留応力が問題になるような部材は疲労などの過酷な使用環境下であることが多く、設計的に応力解析が要求される場合が多い。特に疲労に関する問題では実働荷重下での平均応力と応力振幅の評価が重要であり、実機使用状況下での部材の応力評価には構造解析が最も有効である。その解析の一環として、

単なる外力からの部材応力解析から進歩して、製造過程での応力評価（残留応力評価）を含めた構造解析も実施されるようになった。構造解析は部材のメッシュを一度作成すれば、後は自在に製造条件の変更に応じて材料特性を変更するだけで種々の条件下の解析結果が得られ、最適な製造方法がシミュレーションできるようになった。解析技術による評価は、従来の実験的に評価をおこなう場合と比較して大幅なコストダウンが可能である。最近の残留応力評価は従来の計測主体から解析が主体に変化している。解析結果の妥当性、データのバラツキなどを確認するための残留応力計測がなされ、残留応力計測は数値解析の妥当性確認の手段として実証的に実施している傾向がある。

一方、最近では省エネルギー化、高効率化、高性能化、高信頼性の要求が高まっており、機械設備の構成部材も極限までの性能、評価が要求される。そのための有効な手段として残留応力の導入、評価が以前にも増して採用されている。また、社会インフラ設備の経年化が進み、劣化評価、補修技術の確立が望まれている。これら評価の信頼性を高めるために従来あまり問題視されていなかった残留応力評価が注目されている。このように残留応力解析は社会的ニーズが高まっており、最近の

* 研究開発センター センター長 工学博士 技術士(金属部門 総合技術監理部門)、一般計量士、環境計量士(騒音・振動関係)

技術動向と当社の取り組み状況について紹介する。

2. 構造解析における残留応力の計算

最近では複雑な構造解析もパソコンでも解析できるようになり、計算コストが大幅に安価になるに従って構造解析が一般的に使用されるようになってきている。このような背景の元に、残留応力も構造解析の一環として頻繁に計算されるようになった。ただし、残留応力を評価するためには単純な1次式の弾性式では求められず、ひずみと応力関係が複雑な塑性変形量を加えた弾塑性解析が主体となる。弾性変形で重要なパラメータは縦、横弾性率とポアソン比だけであるが、塑性変形の場合は、弾性変形、塑性変形を区別して評価する必要があり、計算が複雑になる。また、塑性変形量は負荷応力に対して不安定であること、個々のメッ

シュごとに塑性変形量を評価する必要がある。この塑性変形量は応力によって制限されるのではなく、周囲の弾性応力以下である部位（エレメント）の拘束を受ける。

図1は一般的な鉄鋼材料の引張試験結果であるが、鉄鋼材料の場合、上降伏点を超えた領域で塑性変形が顕著になる。この塑性変形挙動は材料に大きく依存し、同等材料でもそれまでの応力負荷履歴に大きく依存する。さらに製造過程での負荷履歴の影響も評価しなければならず、そのための材料データとして、試験温度別、試験片形状、変形速度依存、繰返数による変化特性など各条件別の多くのデータが要求される。さらに溶接、熱処理など高温領域での問題として、クリープによる応力緩和、材質変化などの特性を含めた評価が要求される。

解析の計算精度を上げるためには時間依存性、応力変化速度依存性に対応した計算ステップ間隔、解析エレメントメッシュを細かくすることも重要であるが、基本となる材料物性の取得、評価、簡易解析も重要になってくる。しかし、これらの精度を高めるために闇雲に細かくデータを集めるよりも、残留応力の有効数字、評価に必要な精度、材料のバラツキなどを考慮した適切なモデル化が重要である。構造解析で問題になるのは材料変形挙動のモデル化であり、モデル化によって結果が大きく変わる。変形の種類別に計算方法を以下のように分類、解析している。

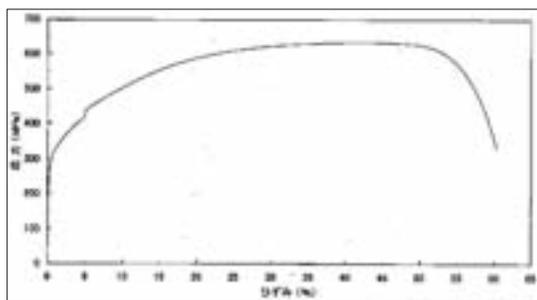
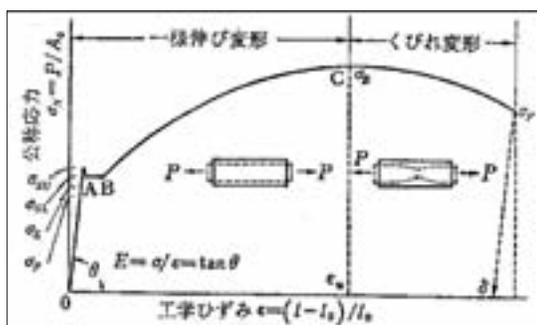


図1 引張試験による応力 - 変位全体曲線

2.1 弾塑性解析（常温の挙動を主とするもの）

図2に弾塑性モデルにおける簡易応力 - ひずみ曲線を示す。最近では解析用データメモリーが大きくなり、図2に示すような単純モデルではなく、図1の応力ひずみ線図から求められる真ひずみ - 真応力線図そのものをデータとして採用する場合もある。いずれにしても変形パターン原理は図2

の3つのパターンの組合せである。各モデルの特徴を紹介する。

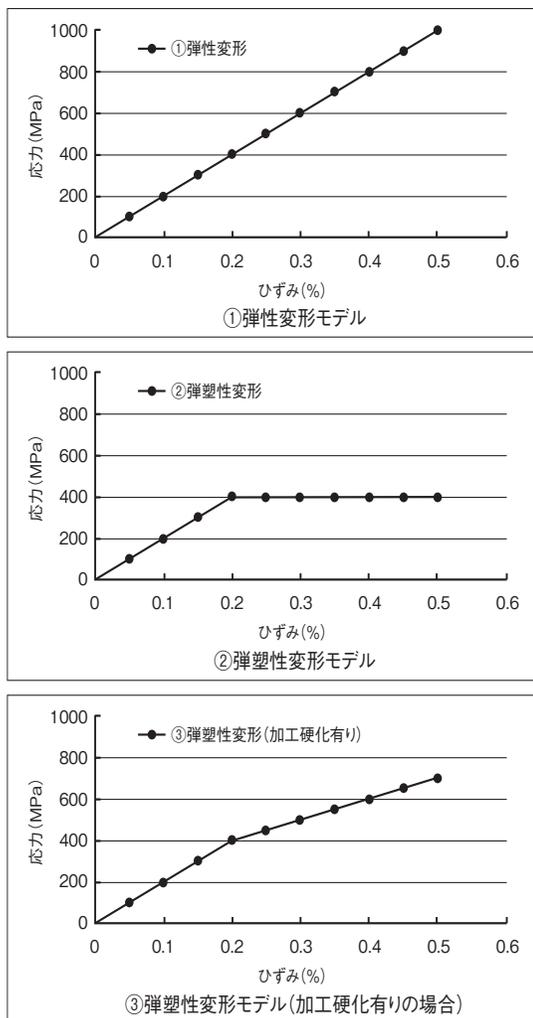


図2 代表的な応力-ひずみ曲線モデル

①弾性変形

弾性変形モデルの場合は、物体のひずみと応力は比例関係を示しており、応力が除去されると元の形状に戻る。一般の構造解析に用いられている手法であり、発生する応力が弾性変形内で物体に作用する応力が小さい場合である。高応力下の解析でも鉄鋼材料関連で焼き入れ材、鋳物材などの低延性材や、非金属ではセラミックス、ガラスな

どの解析に採用される。この弾性変形モデルでは、塑性変形が発生しないので残留応力は全く発生しない。

②弾性-塑性変形

弾性-塑性変形は、降伏点以上の応力に対しては、材料自体は加工硬化もなく、降伏点応力一定であり、塑性変形のみが進展する。これは、軟鋼などの鉄鋼材料で降伏点現象が発生する材料に適用できる。また、計算上ではひずみに関係なく応力は降伏点以上の数値にはならないので、解析やすく、簡易弾塑性解析を使用する場合には、このモデルを使用する機会が多い。しかし、実際の塑性変形量が1~2%以下の制限があること、繰返変形、大きな変形があれば加工硬化するので、実験結果と合わない場合が多い。例えば、ショットピーニング加工のように極表面に大きな塑性変形を与えるような強加工した場合には、塑性変形による加工硬化量も大きくなるが、本モデルでは残留応力は降伏点以上の応力は計算で求められない。

③塑性変形によって加工硬化する場合

ステンレス鋼のように、降伏点現象が明確でなく、降伏強度の代わりに0.2%耐力を求めるような材料に適用する。このモデルでは、応力が増加するに従って、荷重変位曲線が直線からずれる挙動を示す。この直線上が弾性変形であり、その直線からずれた量が塑性変形である。塑性変形しながらでも応力は加工硬化で増加する。しかし、応力を除去した場合には直線的にもどり、応力0レベルで塑性変形量が残る。さらに再度応力を負荷した場合には、ほぼ前の応力レベルまで弾性的に変化し、前回以上の応力レベルになった時に塑性変形が発生する。従って、モデル化には繰返硬化を考慮するか、繰返変形挙動を入れる必要がある。ステンレス鋼、アルミ合金、銅合金など炭素鋼以外の一般金属が該当する。

2.2 繰返応力の場合（疲労の場合）

2.1 ①の弾性変形モデルでは、塑性変形が起きない弾性領域内で繰返応力が負荷されるので、応力が変動するだけである。ミクロ的には不可逆のすべり変形が発生し、疲労損傷が蓄積することになるが、計算上では何も変化は出てこないし、残留応力も発生しない。

2.1 ②の弾塑性変形モデルでは、降伏点以上の応力は発生せず、降伏点以上のひずみが発生する部位は塑性変形するだけである。繰返効果では、引張、圧縮の塑性変形分布が変化するだけで、降伏点以上の応力は発生しない。計算結果で弾性域、塑性域の区分が明確にできる。また、応力の負荷状態ではひずみが蓄積、一方向に伸びるラチェット変形などが発生する。このモデルでは、残留応力は降伏点以上発生しないことになる。

2.1 ③の加工硬化を考慮した変形では、計算は複雑になる。繰返応力による加工硬化分だけ弾性変形量が増加し、繰返によって弾性-塑性域の分布量が変化し、この効果を計算で評価する必要がある。発生する応力も局部的には真破断応力（材料が破壊する直前の応力、引張強度よりも相当高い応力）レベルに到達する場合もある。計算に用いられる基礎データとしては、ひずみ範囲を徐々に大きく（インクリメンタル）したり、小さく（デクリメンタル）して繰返応力-ひずみ線図をもとめ、簡易的に使用する場合がある。実際の残留応力計算には、このモデルが適しており、局部的に大きな塑性変形させるショットピーニングのような解析に適している。そして、残留応力は真破断応力までの高い応力が発生する可能性がある。

2.3 溶接・熱処理における塑性変形

残留応力が最も問題になるのは、熱処理、溶接部など熱が関係していることが多い。構造部材は通常溶接施工されるが、溶接は局部的に短時間で

常温から融点まで温度が変化する。この急加熱、急冷で部材に大きな温度勾配が生じ、熱膨張差によるひずみが発生し、大きな残留応力が発生する。鉄鋼材料の場合には、加熱冷却過程で金属組織がbcc構造（body-centered cubic lattice: 体心立方格子構造）からfcc構造（face-centered cubic lattice: 面心立方格子構造）に変化する変態点があり、さらに冷却過程では、マルテンサイト変態、セメンタイトの析出、ペーナイト相、フェライト相など冷却速度と合金成分に依存する金属組織変化が発生する。鋼の熱処理はこの変態挙動を利用して材料特性を改良する方法であるが、溶接と同様に大きな残留応力が発生する。また、このような組織変化が無くても、材料の機械的特性は温度に大きく依存し、耐力、強度は言うまでもなく、弾性率、ポアソン比、熱膨張係数なども変化する。金属組織が変態するとこれら物性値は瞬時に大きく変化し、それが大きなひずみの発生源にもなっている。部材が厚肉で溶接パス数が多くなれば、繰返加熱が加わり、冷却速度も多様に変化することから複雑な残留応力分布を示す。このように、熱処理、溶接部の応力解析は複雑で多くの研究者が研究しており、単に残留応力解析と言えば溶接・熱処理の応力解析を意味するほど、重要な課題である。

2.4 クリープ変形の評価

火力発電設備、ガスタービンなどの高温機器ではクリープが問題になる。クリープは時間と共に変形が進む現象のことであり、変形は温度・応力・時間に大きく依存する。温度、時間は精度良く評価できるが、応力には外部からの1次応力、熱膨張差で発生する2次応力に加えて、製造時、運用時に発生する残留応力の影響も受ける。図3は火力発電設備の主蒸気管で、運用時に発生した残留応力が原因でクリープ損傷が発生した事例である（Ref.1）。設計条件で1次、2次応力は精度良

く評価されてあまり問題にならないが、この残留応力による不具合はしばしば見逃され、問題が発生してから気がつくことが多い。

クリープ強度計算技術はここ30年で大きく進歩してきており、ほぼ計算で評価できるようになった。図4は火力発電用タービンバルブの損傷事例であるが、運用時の応力解析、残留応力評価、応力緩和計算、クリープ損傷計算を実施して、

当時盛んに研究されていたクリープ疲労損傷評価手法の妥当性を実機で最初の実証した例である(Ref.2)。

2.5 残留応力解析の課題

以上紹介したように、残留応力解析を実施するには、単純な弾性体解析モデルでは答えが得られず、対象とした部材の状況によって適切な評価手

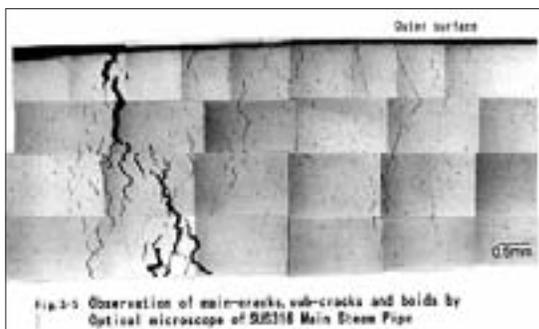


図3 火力発電プラント用主蒸気管のリーク事故
(配管に発生した残留応力で損傷が加速されたクリープ損傷例)

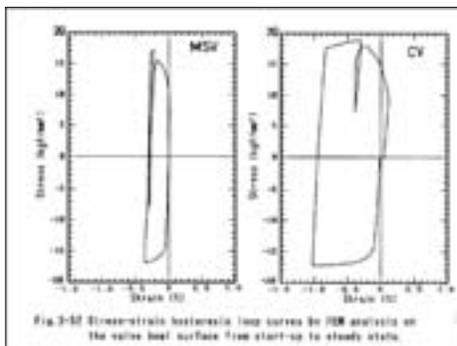
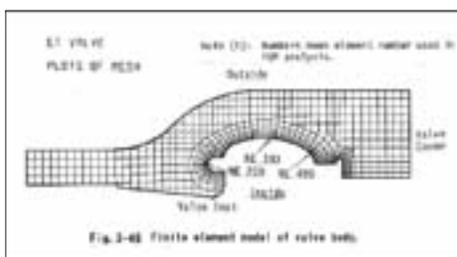
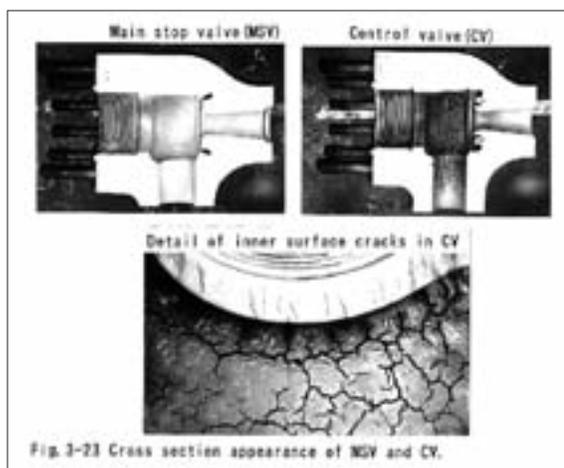


図4 タービンバルブの応力解析例
(熱応力で発生した残留応力解析をおこない、クリープ疲労損傷評価を実施した例)

法を選択しなければならない。残留応力の計算で最も需要が高い溶接部の計算では、各温度別の材料強度、物性値データ、熱伝導率、等の材料データ以外に溶接入熱特性などが必要である。実用上では、これらの数値を細かくして計算回数を増やしていくよりも、主要な温度域を細かくし、変化の少ない領域を荒くする等により計算モデルの簡略化をはかり、実態と合うような計算結果が得られるようにすべきである。図5は、厚板溶接部における板厚方向の残留応力計算結果とDHD (Deep-Hole Drilling) 法による計測結果を示すが、両者の結果が良く一致しており、計算結果、計測値が妥当な数値であることを示している (Ref.3)。

このように解析技術の進歩は著しく、変形には弾性変形、塑性変形、クリープ変形、加工硬化 (繰返変化)、材質の変化 (変態、時効) があり、応力解析には、弾性解析、弾塑性解析、弾性クリープ解析、弾塑性クリープ解析などの解析手法があり、これらのデータ、手法を旨く組み込めば信頼

性の高い結果が得られる。しかし、実際に運用するには計算精度を高くすればそれに伴い計算費用も増加するので、計算による解析と残留応力計測を組み合わせることでコストミニマムな解析の簡略化、近似解を求めることも必要である。重要なのは、実機で実際に問題になっている現象を把握し、実体の計測結果を反映して解析、評価手法を確立することである。

3. 残留応力計測の社会ニーズと背景

最近、残留応力計測の要求が増加している。当社が受託している計測工事の動向から、最近の残留応力計測ニーズを紹介する。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、解析法が採用されている。

①自動車関連部材の品質管理

大量生産品である自動車部品に最も要求されることは軽量化とコストダウンである。軽量化を図

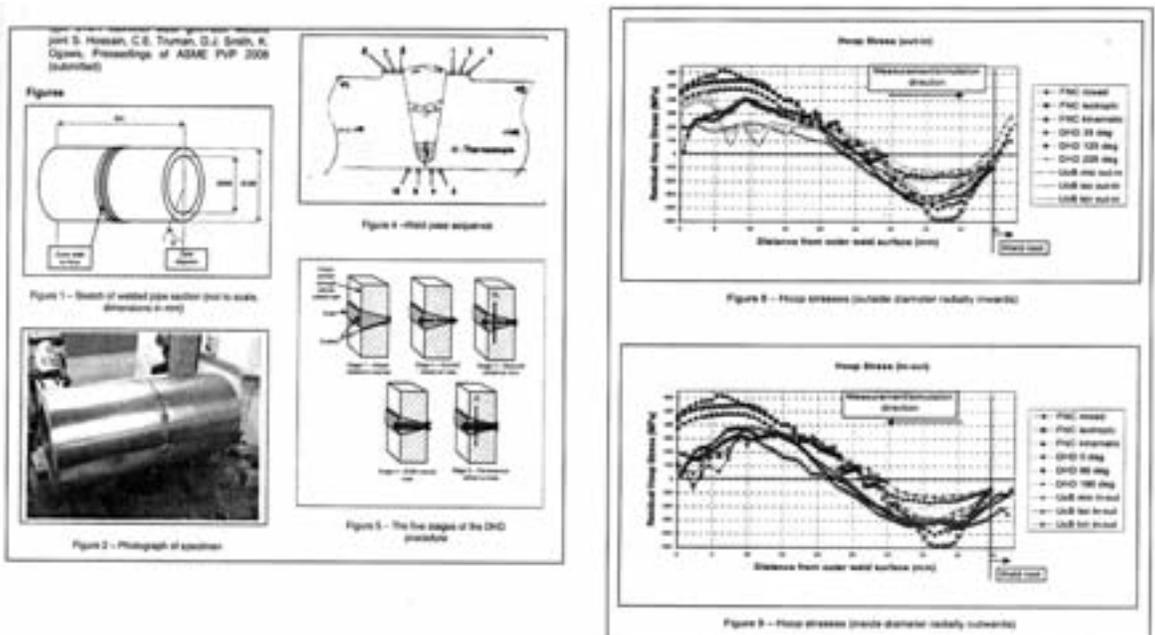


図5 厚肉溶接部の残留応力分布 (DHD 測定結果と解析結果の比較)
(PVP 2008-61542; ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference July 27-31,2008,Chikago)

るためには、部品材料特性を限界まで引き出す必要がある。その有力な手法として残留応力が積極的に利用されている。バネ、ネジ、軸受け、歯車の4つの機械要素には全て熱処理、ショットピーニング、表面処理などの技術を利用して、表面硬化など強度の向上が図られ、それに伴って残留応力が重要な役割をしている。例えば、部材の表面に引張応力しか作用しない部品には、圧縮の残留応力を前もって入れておけば許容できる応力振幅範囲が理論上2倍にまで拡大できる。このように残留応力は部品の小型化、軽量化のために種々の部品に利用されている。大量生産品に対する部品の品質管理方法として、製造技術に安定・確立した方法を採用し、抜き取り検査で品質を確保する方法と、ライン上の全数検査で品質を確保していく方法がある。抜き取り検査では、製品のバラツキ管理が重要であり、全数検査では検査コストを下げる事が要求される。この品質管理技術の一端として残留応力計測も採用されつつある。日本の製品が海外で競争力を発揮しているのは部品の製造方法、品質管理の技術レベルが高く、特に、残留応力、熱処理、表面処理技術が優れていることが大きな要因であるといわれている。残留応力を計測することの重要性が今後も増してくると考えられる。

②原子力関係

原子力機器では、溶接部位の残留応力が一つの要因となって応力腐食割れ（SCC）のトラブルが発生し、種々の対策が取られている。IHIでは、IHISI（Induction Heating Stress Improvement：高周波誘導加熱応力改善）法による配管内面の残留応力を圧縮にする技術を採用して、SCCの発生を防止している。配管溶接部内面に圧縮残留応力を発生させておけば、SCC発生の3要因（材料・応力・環境）が成立しないのでSCCが発生しない。IHISIの施工確認試験で、当社計測事業部が切斷

法による残留応力計測に協力、実施してきた。BWR炉に加えて、今後はPWR型原子力設備の製作に当たっても、残留応力の管理を含めた施工方法を採用していかねばならないが、その過程でも残留応力計測の需要が増加してくると考えられる。

一方、既存設備では経年化が進行し、経年化対策が実機に取り込まれており、安全維持基準にき裂を許す維持基準が採用されつつある。この一環としてSCC対策では、部材表面の引張残留応力によるSCCが表面に発生しても、部材内部では残留応力が引張から圧縮に変わっていれば、それ以上SCCが進展しないと考えられ、内部の残留応力分布を把握する要求が高まっている。この事象を確認、実証できれば、従来補修していたような表面の小さいき裂は一定以上進展しないことになり、SCCは許容され補修する必要がなくなる。そのために溶接部近傍の内部応力分布状態を把握するための内部応力分布計測が重要になっている。JNES（独立行政法人原子力安全基盤機構）では、DHD法や中性子法等の各種残留応力計測手法、数値解析法を用いて内部応力分布計測評価技術を開発しており、当社も積極的に協力している（Ref.4）。

③火力発電設備、石油化学プラント

大型設備では、しばしば残留応力が原因となる損傷が発生している。その都度残留応力を種々の方法で計測し、対策を講じている。特に高温度域で使用される場合には、常に加熱・冷却時の熱膨張、熱応力、拘束条件、熱伝達など多数の応力発生要因が複雑に関係しており、トラブルも多種多様である。残留応力の見知から言えば、部材の使用期間中にも残留応力は変化するので、損傷評価、寿命評価にはこの残留応力の変化過程を正確に把握しておくことが重要である。さらに、発生応力に対して使用温度・時間による応力緩和現象、累積クリープ損傷が評価項目となる。これら解析技

術はほぼ確立しているが、応力・変形計測によるモニター技術の開発要求が高まっている。当社では、高温歪みゲージによる計測、溶射によるゲージの取付、現地での X 線残留応力計測を実施しており、トラブル解決に貢献している。

最近では、経年プラントの補修対策として、溶接補修時に発生する残留応力に起因する SCC 対策として、溶接補修前後に残留応力を計測し、圧縮の残留応力であることを確認するための現地測定ニーズが増加している。今後とも、設備の経年変化が進行すると共に需要が増加すると考えられる。

④社会インフラ設備

製造設備と同様に国内では昭和 30 年代以降の高度成長期に多数建造された橋梁、鉄骨構造材の経年変化が問題になりつつある。2 年前にアメリカと中国で原因は別であろうと考えられるが、大型橋梁が続けて落下した。日本でも数年前に高速道路橋脚の経年変化が問題になったが、設備の延命化を図るために今後ますます経年老朽化対策が必要になってくると考えられる。

この対策の一環として、溶接部の残留応力が疲労寿命に影響を与えるとして、部材の健全性評価のための残留応力計測による健全性評価技術が開発されている (Ref.5,6)。この方法が実用化、採用されれば、X3000 (X 線残留応力測定装置) による現地での残留応力計測の役割、装置の需要が増加すると考えられる。

⑤研究開発分野

新素材、複合材の開発が盛んに行われており、残留応力計測は重要な計測項目である。これまでの金属が主体でなく、高分子材料、無機材料 (セラミック、ガラス) の残留応力計測も増加すると考える。残留応力の計測方法は目的に応じて種々のものが採用されているが、今後も新しい評価手法が開発されることを期待したい。

4. おわりに

当社では、客先の要求に応じて種々の残留応力計測を実施している。不具合原因究明、不具合対策のための計測、現地計測、製品計測サービス等を実施しているが、残留応力計測需要は今後とも増加してくるものと考えられる。個々の測定法には特徴があり、組み合わせで計測できるようにしておくことが重要であり、新技術も適時取り入れて、客先の要求に今後とも応えられるようにしておきたい。

5. 参考文献

- Ref.1) Delong, 木原、中代、石本、梶谷：火力原子力発電、Vol.35, No.3, p227
- Ref.2) Delong, 石本、梶ヶ谷、中代、吉川、時政、渡辺、大友、本田：火力原子力発電、Vol.35, No.11, p31
- Ref.3) 2008 ASME Pressure Vessels and Piping Conference (PVP 2008 Chicago):Welding, Residual stress session, Veqter Ltd. 発表論文、http://www.veqter.co.uk/Expertise_Technology.htm
- Ref.4) 小川和夫：「原子力機器の構造健全性評価と残留応力研究の現状」JNES 資料
- Ref.5) 第41回 X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集：日本材料学会、2006.7
- Ref.6) 第42回 X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集：日本材料学会、2007.7



研究開発センター センター長
工学博士、技術士 (総合技術監理・金属材料部門)、
一般計量士、環境計量士 (騒音・振動関係)
中代 雅士
TEL. 045-759-2927
FAX. 045-759-2155