

# DHD 残留応力測定法について

三上 隆男\*

Mikami Takao

原子力発電の分野では、1974年頃から原子炉圧力容器や容器内構造物、配管系に SCC (Stress Corrosion Cracking) が発生して大きな問題となっており、対策が採られてきている。SCC に対する健全性評価のためには、それを引き起こす要因の一つである残留応力分布を知る必要がある。DHD (Deep Hole Drilling) 法は構造物内部 (板厚方向全体) の残留応力分布を測定できる唯一の技術である。DHD 法は英国 Bristol 大学の Smith 教授等が 1992 年から英国の原子力産業界の資金援助を受けて開発したものであり、2006 年頃から世界的に注目され、英国はもとより、日本、米国、フランス、ドイツ、スペインなどで広く採用されている。本報では DHD 法の測定原理、測定事例などについて紹介する。

キーワード：DHD, 残留応力測定, トレパニング, EDM, 応力解放, エアゲージ

## 1. はじめに

材料内の残留応力を測定する方法には多くの種類がある<sup>(1)(2)</sup>が、測定後の部材の完全さの程度によって3種類のカテゴリ：非破壊法 (non-invasive)、部分破壊法 (semi-invasive)、完全破壊法 (totally destructive) に分類できる。

種々の残留応力測定方法を鋼材に適用した場合について、その貫通深さの比較を図1に示す<sup>(3)</sup>。

非破壊法には通常の X 線回折法 (X-ray)、中性子回折法 (Neutrons)、超音波法 (Ultrasonic) および磁歪法 (Magnetic) があるが、残留応力の測定深さは表面近傍に限定される。通常の低エネルギー X 線 (例：IIC の X3000) では、測定深さは鉄鋼の場合 5 ~ 6  $\mu\text{m}$  であるが、高エネルギーシンクロトロン X 線 (Synchrotron X-ray) では約 0.2 mm まで測定し得る。超音波法は、鉄鋼に適用し

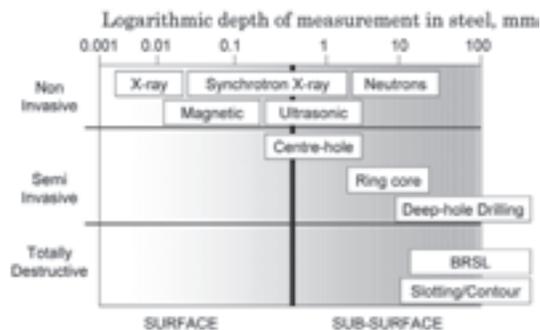


図1 各種残留応力測定法の貫通深さ比較

た場合、2 mm の深さまで測定できる。

部分破壊法と完全破壊法は両者とも材料除去により解放されるひずみの測定に依存している。

部分破壊法には穿孔法 (Centre-Hole)、Ring Core 法および DHD (Deep Hole Drilling) 法がある。穿孔法は 2 ~ 4 mm の深さまで測定可能であり、Ring Core 法は 15 mm の深さまで測定実績がある。

\* 計測事業部 技師長 博士 (工学) 技術士 (機械部門) 環境計量士 (騒音・振動関係)

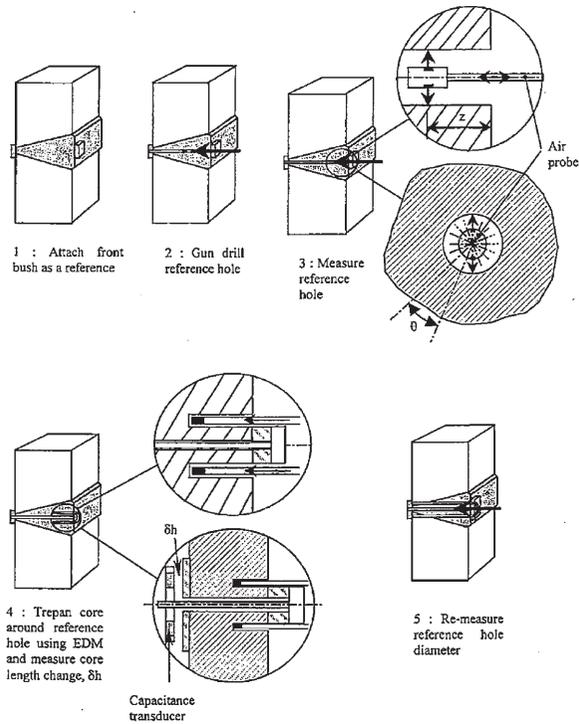


図2 DHD 残留応力測定の基本手順

DHD 法は鉄鋼の場合、750 mm の深さまで測定実績がある。

破壊法には Slotting/Contour 法、BRS (Block Removal, Splitting and Layering) 法、固有ひずみ法などがあり、板厚方向全体の残留応力測定が可能である。しかし、これらの方法は測定対象物を完全に破壊してしまうので、さらに測定を行うことは不可能である。

原子力発電の分野では 1974 年頃から原子炉圧力容器や容器内構造物、配管系に発生した SCC (Stress corrosion cracking) が問題となり、対策が採られてきた。SCC を引き起こす要因の一つに引張残留応力がある。SCC に対する健全性評価のためには、板厚方向の残留応力分布を測定する必要があるが、DHD (Deep Hole Drilling) 法はその要求に応えられる唯一の測定技術である。

DHD 法の基本原理は Beancy<sup>(4)</sup> によって発明さ

れ、英国 Bristol 大学の Smith 教授等が 1992 年から英国の原子力産業界の資金援助を受けて開発したものである<sup>(5)</sup>。現在、同大学からスピンアウトした会社：VEQTER 社が測定サービスを実施している。IIC は 2008 年からこの会社の日本国内独占代理店となっている。DHD 法は 2006 年頃から世界的に注目され、英国はもとより、日本、米国、フランス、ドイツ、スペインなどで広く採用されている。

DHD 法については IIC Review の 39 号と 41 号で概要が紹介<sup>(1)(2)</sup>されているが、本報では測定原理についてやや詳しく解説した後、測定事例などについて紹介する。

## 2. 測定手順 (図 2 参照<sup>(6)</sup>)

Step 1 測定対象部の前面と背面にブッシュを接着  
ブッシュを取り付ける理由は、Step 2 のガンド

リル時に測定対象部の端面が朝顔状に削られないようにするためと、Step 3 の穴径計測装置の位置決めを正確にするためである。

## Step 2 ガンドリルによる参照孔の穿孔

ガンドリルは自動調心チップ付きの特殊なタイプである。これは、高い直線性が必要とされる長い穴の穿孔に適している。参照孔の直径は対象物の肉厚に応じてφ 1.5 mm、φ 3 mm、φ 5 mm の 3 種類の中から選択される。

## Step 3 参照孔の直径測定

ガンドリル終了後、参照孔は研磨して適切な表面粗さに仕上げる。

直径の測定はエアゲージ (Thomas Mercer Limited 製) を用いて、深さ方向 0.2 mm 毎に円周方向 18 箇所の測定を行う。

## Step 4 トレパニング (切り抜き穿孔)

参照孔を包含する円筒 (コア) を放電加工 (EDM) で切り抜く。コアの直径は参照孔の直径に対応して、それぞれφ 5 mm、φ 10 mm、φ 15 mm が選択される。トレパニング過程で、測定対象物や大気温度変化などに起因するコア高さの変化も測定する。図 3 に VEQTER 社で実施した

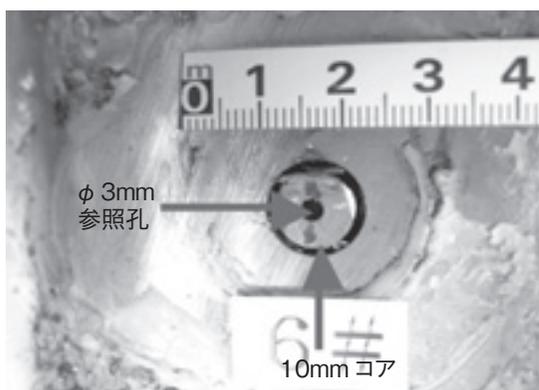


図 3 トレパニングの一例

一例として厚板溶接部の DHD 測定においてφ 3 mm の参照孔を包含するφ 10 mm のコアをトレパニングした後、コアを元の位置に戻した状況を示す。この例ではコア高さ (測定深さ) は約 100 mm である。

## Step 5 参照孔の直径の再測定

コアを放電加工で切り抜いた後、Step 3 と同様に参照孔の直径を再測定する。

## Step 6 残留応力解析

Step 3 で測定した穴径は応力が存在する状態のものであるが、Step 4 で応力は解放されるので、Step 5 で測定した穴径は応力が存在しない状態のものである。Step 3 と 5 の直径差から、次項で述べる変位解析により元々存在していた残留応力の解析が可能となる。

### 3. 変位解析<sup>(6)</sup>

測定位置に元々存在していた残留応力とトレパニングによる穴径およびコア高さの変化との関係を求める必要がある。ここで、板厚方向は主応力方向であり、コアの断面に相当する環状面積内では応力は一様であると仮定する。

解析の第一ステップは、一様単軸応力場でトレパニングによる参照孔縁部の半径方向変位を計算することである。半径  $a$  の穴を有する平板に一様な単軸応力  $\sigma$  が作用する場合、平面応力条件下における半径方向変位  $u$  は弾性論<sup>(7)</sup> から次式で与えられる。

$$u_r = \frac{\sigma a}{E} \left\{ \frac{1}{2}(1+\nu) \frac{a}{r} + \frac{1}{2}(1-\nu) \frac{r}{a} \right\} + \frac{\sigma a}{E} \left\{ \frac{1}{2}(1+\nu) \frac{r}{a} \left( 1 - \frac{a^4}{r^4} \right) + \frac{2a}{r} \right\} \cos 2\theta \quad (1)$$

ただし、 $E$  はヤング率、 $\nu$  はポアソン比、 $\theta$  は応力  $\sigma$  の作用軸からの角度である。

穴の縁部、 $r = a$  では(1)式は次式に簡略化できる。

$$u_r = (1 + 2 \cos 2\theta) \sigma \frac{a}{E} \quad (2)$$

直径を、 $d_0=2a$  直径変化を  $\delta (= 2u_r)$  と表せば、(2) 式は次式となる。

$$\delta = D \frac{\sigma}{E} \quad (3)$$

ただし、 $D = d_0 (1 + 2 \cos 2\theta)$

トレパニングにより応力が解放されたときは、変位は逆になり (3) 式は次式となる。

$$-\delta = D \frac{\sigma}{E} \quad (4)$$

応力  $\sigma_1$  に対する 1, 2, 3, 4 方向 (図 4 参照) の変位は平面応力条件下では (3) 式にそれぞれの方向の  $\theta$  を代入すると、次式のように行列 (Matrix) 表示できる。

$$\begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 3d_0 \\ -d_0 \\ -v\Delta z \\ d_0 \end{bmatrix} \sigma_1 \quad (5)$$

ただし、 $\Delta z$  はトレパニング深さの増分

穴を有する平板に多軸荷重が作用する場合は、穴の縁部のいかなる場所においてもその位置の変位は各残留応力に対する変位の重ね合わせとなる。図 4 の表記を用いれば、応力  $\sigma_j$  に対する半径方向変位  $\delta_i$  は次式で与えられる。

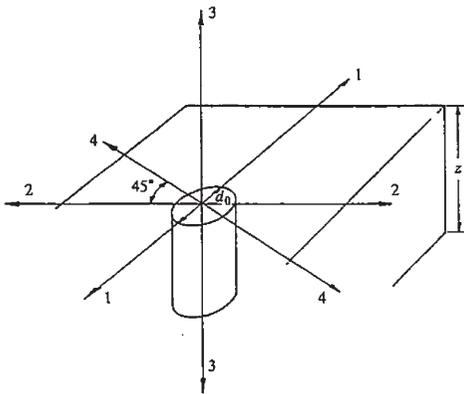


図 4 DHD 測定における軸の方向

$$\delta_i = D_{ij} \frac{\sigma_j}{E} \quad (6)$$

ここで、 $D_{ij}$  は内部応力  $\sigma_j$  に対する変位  $\delta_i$  に関連する影響係数である。

方向 1 と 2 の応力は穴軸に垂直な平面内の互いに直交する独立した応力であり、方向 3 の応力は板厚方向の応力である。 $\sigma_1$  と  $\sigma_2$  と同一平面内に生じるせん断応力  $\sigma_4$  は方向 4 の引張応力 ( $+\sigma_4$ ) であり、方向 4 に対して  $90^\circ$  の方向では圧縮応力 ( $-\sigma_4$ ) である。

板厚が薄い場合、独立に作用する各応力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  はそれぞれの方向に直角な方向にポアソン収縮を生じさせると仮定できる。

板厚方向の応力  $\sigma_3$  は板厚方向には単純に引張力を増加させ、面内にはポアソン収縮を生じさせる。したがって、

$$\begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} -vd_0 \\ -vd_0 \\ \Delta z \\ -vd_0 \end{bmatrix} \sigma_3 \quad (7)$$

せん断応力  $\sigma_4$  は方向 4 にのみ変形を生じ、 $\delta_4$  は単純に  $4d_0\sigma_4/E$  である。

したがって、多軸荷重  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$  に対する変位を重ね合わせると、内部応力  $[\sigma] (= [\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \sigma_4]^T)$  に対する変位  $[\delta] (= [\delta_1 \delta_2 \delta_3 \delta_4]^T)$  に関連する影響係数行列  $[D] (= [D_{ij}])$  は、次式で与えられる。

$$[D] = \begin{bmatrix} 3d_0 & -d_0 & -vd_0 & 0 \\ -d_0 & 3d_0 & -vd_0 & 0 \\ -v\Delta z & -v\Delta z & \Delta z & 0 \\ d_0 & d_0 & -vd_0 & 4d_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

したがって、(3) 式を多軸荷重の場合に書き換えると、

$$[\delta] = \frac{1}{E} [D][\sigma] \quad (9)$$

(9) 式の両辺に  $[D]$  の逆行列  $[D]^{-1}$  をかけて整理すると、

$$[\sigma] = E[D]^{-1}[\delta] \quad (10)$$

ここで、逆行列  $[D]^{-1}$  は、正方行列に対する代数学の公式から、以下ようになる。

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} A & B & L & 0 \\ B & A & L & 0 \\ N & N & M & 0 \\ C & C & 0 & -2C \end{bmatrix} \quad (11)$$

ただし、

$$A = (3 - \nu^2) / \{8d_0(1 - \nu^2)\}, B = (1 + \nu^2) / \{8d_0(1 - \nu^2)\}, L = \nu / \{2z(1 - \nu^2)\} \\ M = 2L/\nu, N = \nu / \{2d_0(1 - \nu^2)\}, C = -1 / (8d_0)$$

したがって、参照孔の穴径変化の測定結果から  $[\delta]$  が求まり、(11) 式から  $[D]^{-1}$  が計算できるので、コンピュータにより連立方程式 (10) を解けば残留応力が求まる。

なお、応力を求めるには、半径方向の変位は 3 箇所でも十分であるが、2 項で述べたように円周方向 18 箇所でも変位を測定しているので、実際には測定変位に対して最小 2 乗法を適用している。その詳細は複雑になるので省略する。

#### 4. 検証試験と測定限界

##### (1) 検証試験

DHD 法の検証については、前述の Smith 教授等が精力的に実施している。アルミニウムやステンレス鋼製試験体の引張試験、曲げ試験、ねじり試験、外圧負荷試験を行い、ひずみゲージや理論解析との比較を行っている<sup>(3)</sup>。また、矩形断面の棒鋼を 4 点曲げで塑性変形させ、ひずみゲージとの比較も行っている<sup>(6)</sup>。さらに、2 項の手順を FEM によりシミュレーション解析して DHD の妥当性を検証している。

種々の試験結果から、DHD 測定の不確かさはアルミニウムで 10MPa、鉄鋼で 30MPa、チタンで 15MPa としている。

##### (2) 測定限界

DHD 法は 10 mm 以下の厚さの部材には適用できない。コア径に比べて肉厚が十分大きくないと残留応力の平均化によりピークが捉えられなくなるため、部材の肉厚は最小コア径 (5 mm) の 2 倍以上を基準としている。一方、最大厚さは 750 mm まで測定した実績がある。また、穴径をエアゲージで測定しているが、その構造上の制約のため表面から 0.5mm までの範囲は測定ができない。

#### 5. 測定結果の一例

VEQTER 社は JNES (独立行政法人 原子力安全基盤機構) の残留応力に関するプロジェクトの中で多くの DHD 測定を実施している。それらの成果は ASME PVP 2008 (ASME, Pressure Vessels and Piping Division Conference, 2008) で発表されている。ここでは、他の分野での適用事例として VEQTER 社が実施した以下の 2 例を紹介する。

##### 5.1 鋼製ロールの DHD 測定<sup>(8)</sup>

圧延機のロールは耐摩耗性と寿命を改善するため、焼入れされる。焼入れにより、表面には圧縮の残留応力が生じるが、残留応力の内部平衡性からロールの深層部には引張応力が生じる。この引張応力は寿命を減少させる要因となる。焼入れに起因する圧縮応力と引張応力のトレードオフ関係を明らかにするため DHD で残留応力を測定した。

試験体は図 5 に示すようなモックアップで、質

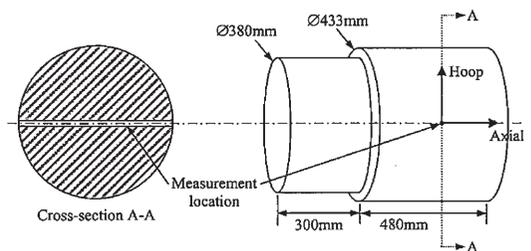


図 5 鋼製ロールモックアップと DHD 測定位置

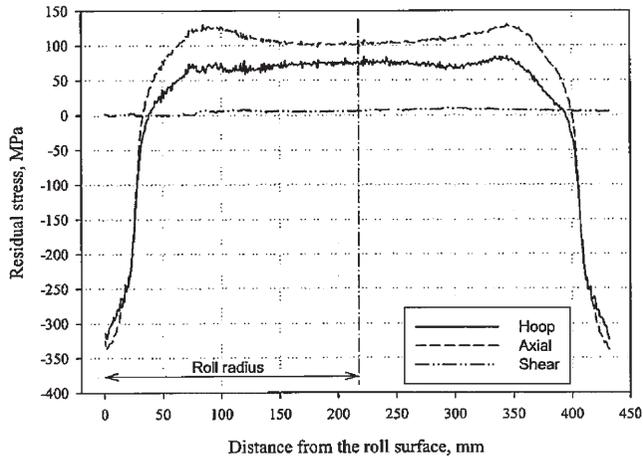


図6 鋼製ロールモックアップの残留応力分布

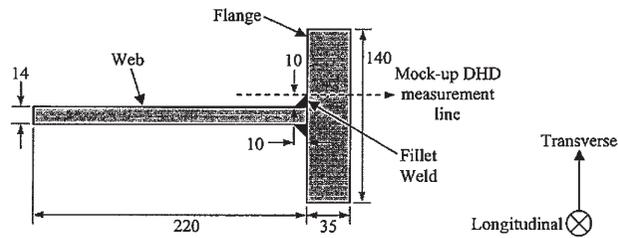


図7 T型断面リングのモックアップ

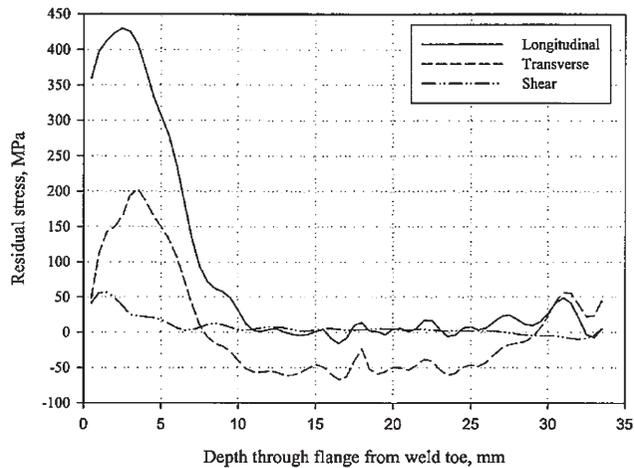


図8 T型断面モックアップの残留応力分布

量は 830kg である。(圧延機に使用される実物ロールは何と 80 ~ 460 ton ! ) 測定深さは 433 mm である。

結果を図 6 に示す。予想されたように、外表面近傍では円周方向も軸方向も圧縮応力である

が、30 mm より内部では引張応力に転じている。せん断応力はほぼゼロである。これは円周方向と軸方向が主応力方向であることを示している。残留応力分布はロール中心線に関して対称である。

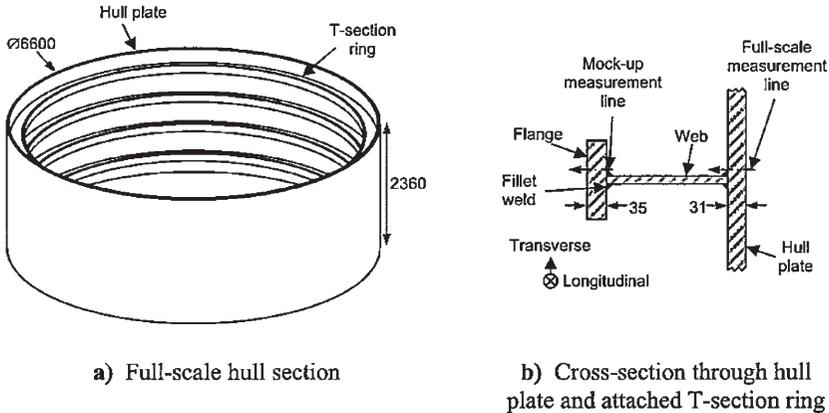


図 9 潜水艦の外殻断面

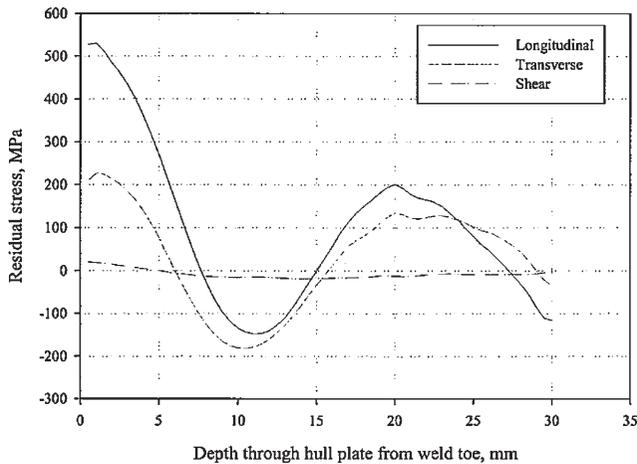


図 10 フルスケール外殻断面の残留応力分布

## 5.2 潜水艦構造部材の DHD 測定<sup>(9)</sup>

潜水艦は、数個の環状外殻を溶接して製造される。各環状外殻は数個の曲面板を互いに溶接した後、内面を規則的な間隔で配置された T 型断面リングで溶接補強して製造される。

T 型断面リングは数個のウェブとフランジ板を塑性曲げ加工した後、それらを溶接して製造する。外殻の内面にこの T 型断面リングを溶接した際に発生する残留応力が問題となっている。そこで、小さな T 型断面モックアップを製作して、DHD で残留応力を測定した。図 7 にモックアップの形状を示す。長さ（紙面に直角方向）は 1000 mm である。測定場所は HAZ（Heat Affected Zone）内

とした。

図 8 に測定結果を示す。縦方向および横方向の残留応力は溶接部先端部近くでピークとなり、8mm 以上の深さでは急激に減少する分布となっている。最大残留応力は溶接先端部から 2.5 mm の深さ位置で 430MPa（縦方向）である。せん断応力はほぼゼロであり、縦方向および横方向が主応力方向であることを示している。

次に、フルスケールの環状外殻で測定をした。図 9 に長さ 2360 mm、外直径 6600 mm、厚さ 31mm のフルスケール環状外殻を示す。

図 9 に示すように、測定場所は上部から 2 番目の T 型断面リングの HAZ 内とし、外側から内側

に向かう方向に実施した。図 10 に測定結果を示す。縦方向（外殻の円周方向）と横方向（外殻の軸方向）も残留応力分布は似通っている。最大残留応力は溶接先端部から 1mm の深さ位置で 530MPa（縦方向）である。せん断応力は非常に小さく、縦方向および横方向がほぼ主応力方向であることを示している。

なお、図 10 の残留応力分布は溶接残留応力と塑性曲げ加工時の残留応力の組合せであることが、図 8 と図 10 の詳細な分析から明らかとなっている。

## 6. おわりに

DHD 残留応力測定法について、Bristol 大学や VEQTER 社が公表している論文および資料を参考にして、できるだけ平易にその測定原理や適用事例について紹介した。

この方法はあくまでも、部材内部の残留応力分布を測定するものであり、前述のように表面から 0.5mm までは測定できないので、表面近傍の残留応力を知りたい場合は X 線回折法（IIC の X3000）や穿孔法を適用する必要がある。

DHD 残留応力測定法は溶接だけでなく、熱処理（例えば 5・1 項の鋼製ロール）や焼嵌め（例えば大型蒸気タービンディスクと軸の結合）により生じた残留応力も同様に測定できる。今後、原子力の分野への適用をベースとしながら、他の分野への適用を提案して行きたい。

## 参考文献

- (1) 中代 “残留応力の基礎（その 2）残留応力計測方法の紹介” IIC REVIEW No.39、2008/4、pp.2-10
- (2) 中代 “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” IIC REVIEW No.41、2009/4、pp.2-9

- (3) George, D , Kingston, E and Smith, D. J. “Measurement of through-thickness stress using small holes”, Journal of Strain Analysis Vol. 37 No 2, IMechE 2002, pp.125-139
- (4) Beaney,E.M. “Measurement of sub-surface stress”, Report RD/B/N4325, Central Electricity Generating Board, 1978
- (5) Smith, D. J. and Bonner, N. W. “Measurement of residual stresses in thick section steel welds”, International Conference on Engineering Integrity Assessment,1994, pp. 259-274 (Engineering Materials Advisory Services, Chameleon Press).
- (6) Leggatt, R. H., Smith, D. J., Smith, S. D. and Faure, F. “Development and experimental validation of the deep hole method for residual stresses measurement”, Journal of strain Analysis Vol. 31 No.3, IMechE 1996, pp. 177-186
- (7) Timoshenko, S and Goodier, J. N. “Theory of Elasticity”, 2<sup>nd</sup> edition, 1951, pp.258-280 (McGraw-Hill, New York).
- (8) VEQTER 社のカタログ “Steel Roll-large measurement depth”
- (9) VEQTER 社のカタログ “Submarine Structure- ‘on-site’ measurement”



計測事業部 技師長  
博士(工学), 技術士(機械部門), 環境  
計量士(騒音・振動関係), 一般計量士  
三上 隆男  
TEL. 045-791-3518  
FAX. 045-791-3542