

DHD 法および iDHD 法による残留応力測定技術

三上 隆男^{*1}
Mikami Takao

DHD (Deep Hole Drilling) 法は厚肉構造物内部 (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 法は英国の Bristol 大学 (University of Bristol) 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、ヨーロッパ、中東、アフリカ、南北アメリカ、アジアおよびオーストラリアの各国で広く採用されている。

近年、塑性の影響を考慮した改良 DHD (iDHD) 法の技術も確立されている。IIC REVIEW No.42⁽¹⁾ で DHD 法の測定原理、測定事例などについて概要を紹介したが、今回は iDHD (Incremental Deep Hole Drilling) 法を含めて測定原理などについてやや詳しく解説する。

キーワード：DHD、iDHD、残留応力、トレパニング、参照孔、EDM、応力解放、エアゲージ、塑性

1. はじめに⁽¹⁾⁽²⁾

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 法は 1970 年以前に岩盤力学の分野で残留応力測定用に開発された over-coring (以後、トレパニング) 技術に由来する。この分野では、参照孔径およびトレパニング径はそれぞれ 38mm、96mm と非常に大きく、金属部品への適用は困難であった。そのため、金属の分野では、残留応力測定法として専ら完全破壊法 (切断法) が適用されていた。金属部品用の DHD 法の基本原理は E.M. Beane

によって発明され、表面近傍の残留応力を測定する穿孔法 (Center Hole Drilling) と区別するために、“Deep Hole Drilling” と名付けられた。Beane は参照孔径を 8mm まで小形化した。金属用としては未だ大きいものであった。その後、Bristol 大学の D.J. 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種々の改良を行い、現在の DHD 法を確立した。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。当社は 2008 年から VEQTER 社の日本国内独占代理店となっている。

本稿では、最新の iDHD 法を含めて測定原理などについてやや詳しく解説する。

2. 測定手順⁽²⁾

図 1 に大きな金属部品の断面と DHD 測定の手順を模式的に示す。

Step 1：測定ラインの入口と出口面に参照ブッ

*1：フェロー 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、JSNDI ひずみ測定・レベル 3、明星大学理工学部非常勤講師

シュを取り付ける。部品とブッシュを貫通する穴（参照孔）を生成する。金属では、この穴は多くの場合、ガンドリルを用いて生成される。

Step 2: エアゲージにより参照孔の直径を円周方向および深さ方向に測定する。

Step 3: トレパニング過程で生じるコアの変形を測定するために一つの装置が組付けられている。通常、トレパニングには EDM（放電加工）が用いられ、トレパニングが完了したとき、参照孔を包含するコアは背面の参照ブッシュによって原位置に保持される。

Step 4: エアゲージにより参照孔の直径が円周方向および深さ方向に再測定される最終ステージを示す。Step 2 と Step 4 の間の直径変化が解放応力を決定するために用いられる。

もし、部品に外力が作用していなければ、これらの応力は、部品内に閉じ込められた残留応力である。もし、部品に外力が作用している場合は、測定応力は負荷および残留応力の組み合わせである。

3. 基本原理⁽²⁾⁻⁽⁶⁾

DHD 法は参照孔軸に沿う応力分布を測定しようとするものである。穴はひずみゲージのような働きをし、応力が解放されたときに、その直径の変化はトレパニングされたコアの肉厚方向の寸法変化とともに測定される。そのため、測定位置に元々存在していた残留応力と測定された穴径とコア高さの変化との間には、ある関係が必要となる。初期の DHD 法の開発においては、測定された変形は弾性解析を用いて応力に変換できると仮定されていた。この近似は、現在は、単に DHD 法と呼び、本章の最初に解説する。その後、トレパニング中に起こりうる塑性について考察する。iDHD 法と名付けた改良技術についても簡単に解説する。

3.1 弾性解析

測定された変形を応力に変換するためには、有限要素法（FEM）など、いくつかの近似法がある。ここでは、比較的単純な方法を解説する。

参照孔を包含している切り抜かれたコアは、**図 2** に示すように参照孔軸に垂直な二つの平行面で束縛されたいくつかのブロックに分割される。同図には、参照孔面内の $x-y$ とその軸に沿った z 軸座標系も示されている。各ブロックは中心孔を包含する平板であると理想化されている。試験体の厚さ方向の選択されたある位置で得られた直径の測定は、各ブロックの中で、ある与えられた角度での参照孔の平均直径であると仮定されている。

また、厚さ方向は一つの主応力方向である、試験体の材料特性は等方性である、参照孔が穿孔される前は各ブロックの中で応力状態は均一である、各ブロックの挙動は他のブロックとは独立していると仮定されている。

トレパニングによりコア内の応力は完全に弾性的に解放されることになる。解析の第一ステップ

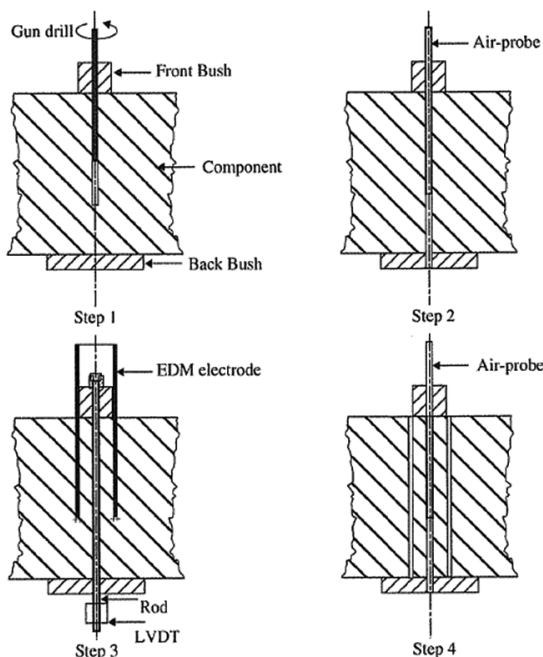


図 1 DHD 法と測定プロセスの概略図⁽²⁾

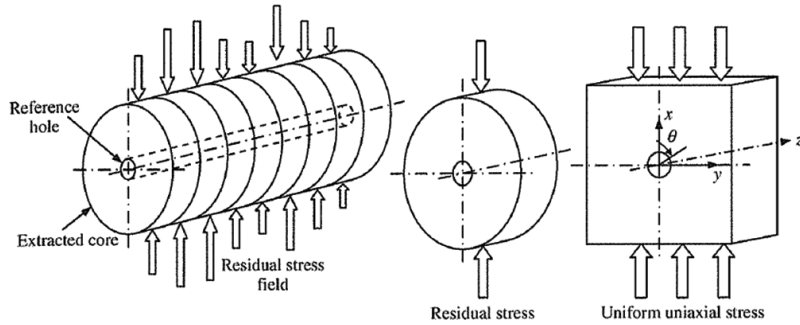


図2 切り抜かれたコア、コア断片およびコア断片の円孔付き板への単純モデル化⁽²⁾

は、与えられたブロックの中でトレパニングに起因する参照孔縁部の半径方向変位を計算することである。板は図3に示すように、2次元平面応力状態 ($\sigma_z=0$) を仮定し、面内で均一な1軸応力を受けていると仮定する。完全に弾性的な挙動を仮定すると、均一に負荷された円孔付き平板の応力と変形状態は、荷重の荷重が穿孔前か穿孔後であるかに係らず、同じである。したがって、トレパニング前の参照孔の変形状態は標準的な弾性解から導くことができる。

一様な応力: σ_{xx} が作用する平板内の穴の周囲の半径方向変位は、弾性理論⁽⁷⁾により、

$$u_r(r, \theta) = \frac{\sigma_{xx} a_r}{E} \left\{ (1+\nu) \frac{a_r}{2r} + (1-\nu) \frac{r}{2a_r} \right\} + \frac{\sigma_{xx} a_r}{E} \left\{ (1+\nu) \frac{r}{2a_r} \left(1 - \frac{a_r^4}{r^4} \right) + \frac{2a_r}{r} \right\} \cos 2\theta \quad (1)$$

ただし、 a_r は穴の半径、 r は穴の中心からの半径位置、 E は材料のヤング率、 ν はポアソン比、 θ は応力 σ_{xx} の作用軸からの角度である。

参照孔を包含するコア材料のトレパニングの効果は、コアの応力をゼロに戻すことである。したがって、トレパニング操作により生じた参照孔の縁部の半径方向変位は、円孔付き無限平板の円孔から遠方位置で一様な応力を作用させたときに生じる変位と大きさが同じで反対方向である。解析では、参照孔の存在がトレパニング前の応力とひ

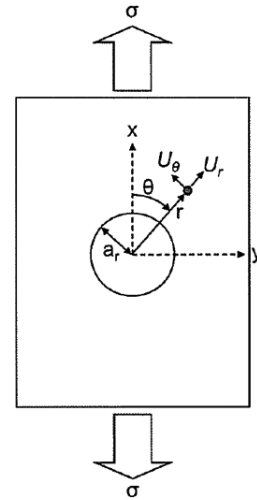


図3 x 方向に一様な応力が作用している円孔を有する平板

ずみ場に及ぼす影響を考慮する。解析により、参照孔位置に元々存在していた応力の計算が可能である。

変位は角度 (θ) 位置で穴の縁部で測定される。したがって、無次元変形、 $\bar{\epsilon}(\theta)$ は、穴の縁部 ($r=a_r$) では、式 (1) に $r=a_r$ を代入することにより次のようになる。

$$\bar{\epsilon}(\theta) = \frac{u_r(\theta)}{a_r} = \frac{d(\theta) - d_0(\theta)}{d_0(\theta)} = \frac{\sigma}{E} (1 + 2 \cos 2\theta) \quad (2)$$

ただし、 $d_0(\theta)$ および $d(\theta)$ は、それぞれ、トレパニング前後の参照孔径である。

式 (2) によれば、例えば、穴縁部の $\theta=0^\circ$ 位置

の無次元変形は、式 (2) に $\theta=0^\circ$ を代入すると、 $\frac{3\sigma}{E}$ となる。同様に、 $\theta=90^\circ$ 位置の無次元変形は式 (2)

に $\theta=90^\circ$ を代入すると、 $-\frac{\sigma}{E}$ となる。したがって、

穴は x 方向に広がり、 y 方向に縮む。また、 x 方向の広がり量は y 方向の縮み量の 3 倍 (絶対値で) であることがわかる。

個々の単軸応力、 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{xy} の効果を組み合わせるために、重ね合わせの原理を適用する。図 4 に示すように平面応力状態にある一般的な円孔付き平板の円孔部の変形に対して重ね合わせの原理を適用すると、無次元変形は以下の手順で解析できる。

σ_{xx} による変形は、式 (2) で σ を σ_{xx} に置き換えると、

$$\frac{d(\theta)-d_0(\theta)}{d_0(\theta)} = \frac{\sigma_{xx}}{E}(1+2\cos 2\theta) \quad (3)$$

σ_{yy} の効果を組み合わせるため、式 (2) で σ を σ_{yy} に、 θ を $(\theta+90^\circ)$ に置き換えると、

$$\begin{aligned} \frac{d(\theta)-d_0(\theta)}{d_0(\theta)} &= \frac{\sigma_{yy}}{E}\{1+2\cos 2(\theta+90^\circ)\} \\ &= \frac{\sigma_{yy}}{E}(1-2\cos 2\theta) \end{aligned} \quad (4)$$

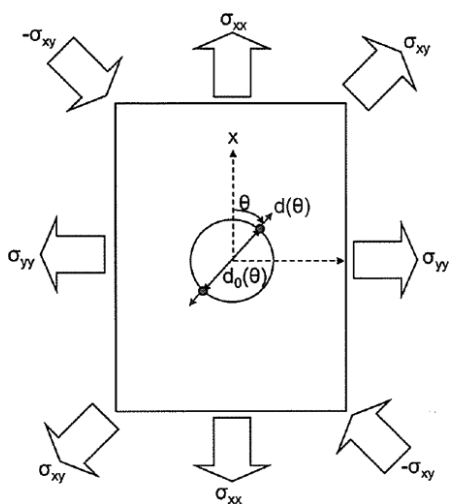


図 4 平面応力状態にある円孔を有する平板の円孔部の変形

せん断応力 σ_{xy} および $-\sigma_{xy}$ の効果を組み合わせるため、式 (2) で σ をそれぞれ σ_{xy} 、 $-\sigma_{xy}$ に、 θ をそれぞれ、 $(\theta-45^\circ)$ 、 $(\theta+45^\circ)$ に置き換えると、

$$\begin{aligned} &\frac{d(\theta)-d_0(\theta)}{d_0(\theta)} \\ &= \frac{\sigma_{xy}}{E}\{1+2\cos(\theta-45^\circ)\} - \frac{\sigma_{xy}}{E}\{1+2\cos(\theta+45^\circ)\} \\ &= \frac{\sigma_{xy}}{E}(4\sin 2\theta) \end{aligned} \quad (5)$$

式 (3) ~ 式 (5) を重ね合わせることで、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \tilde{\epsilon}(\theta) &= \frac{u_r(\theta)}{a_r} = \frac{d(\theta)-d_0(\theta)}{d_0(\theta)} \\ &= -\frac{1}{E}\{\sigma_{xx}(1+2\cos 2\theta) + \sigma_{yy}(1-2\cos 2\theta) + \sigma_{xy}(4\sin 2\theta)\} \end{aligned} \quad (6)$$

なお、トレパニングにより応力が解放されたときは前述のように変位は逆になるため、式 (6) にはマイナスの符号を付している。

変位を 18 方位 (20° ごと) で測定した場合、それぞれの方角で式 (6) に代入すると 18 行の連立 1 次方程式ができる。これを、コンピュータを用いて解くために、マトリクス表示にすると、

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} \frac{d(\theta_1)-d_0(\theta_1)}{d_0(\theta_1)} \\ \frac{d(\theta_2)-d_0(\theta_2)}{d_0(\theta_2)} \\ \vdots \\ \frac{d(\theta_{18})-d_0(\theta_{18})}{d_0(\theta_{18})} \end{bmatrix} \\ &= -\frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1+2\cos 2\theta_1 & 1-2\cos 2\theta_1 & 4\sin 2\theta_1 \\ 1+2\cos 2\theta_2 & 1-2\cos 2\theta_2 & 4\sin 2\theta_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1+2\cos 2\theta_{18} & 1-2\cos 2\theta_{18} & 4\sin 2\theta_{18} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

さらに表示を簡略化すると、

$$\bar{d} = -\frac{1}{E} \mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (8)$$

ただし、

$$\bar{d} = \begin{bmatrix} \frac{d(\theta_1) - d_0(\theta_1)}{d_0(\theta_1)} \\ \frac{d(\theta_2) - d_0(\theta_2)}{d_0(\theta_2)} \\ \vdots \\ \frac{d(\theta_{18}) - d_0(\theta_{18})}{d_0(\theta_{18})} \end{bmatrix},$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 + 2\cos 2\theta_1 & 1 - 2\cos 2\theta_1 & 4\sin 2\theta_1 \\ 1 + 2\cos 2\theta_2 & 1 - 2\cos 2\theta_2 & 4\sin 2\theta_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 + 2\cos 2\theta_{18} & 1 - 2\cos 2\theta_{18} & 4\sin 2\theta_{18} \end{bmatrix},$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}$$

式 (8) の両辺に M の逆行列 M^{-1} を掛けて整理すると、

$$\sigma = -EM^{-1} \cdot \bar{d} \quad (9)$$

式 (9) を解けば、残留応力を求めることができる。しかし、2次元平面応力問題では、未知数は3個 (σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{xy}) であり、18個の測定結果は過剰である。したがって、実際には図5に示

すように、18個の測定結果を最小二乗法により処理し、変形後の円孔のベストフィット形状を算出している。これにより、測定誤差も減少させている。この場合、式 (9) は次式ようになる。

$$\hat{\sigma} = -EM^* \cdot \bar{d} \quad (10)$$

ただし、

$$M^* = (M^T \cdot M)^{-1} \cdot M^T \quad (11)$$

M^* はマトリクス M の一般化逆行列 (Pseudo-inverse matrix) であり、最小二乗最適化のプロセスでよく使用される。 $\hat{\sigma}$ は測定された変形をベストフィットする最適応力ベクトルである。

3.2 塑性の影響

金属部品の内部に降伏点に近い高い残留応力が存在すると、DHD法の材料除去過程で塑性が生じうる。塑性は、DHD法による残留応力測定においては、二つの理由により誤差を生じさせる。一番目に、穿孔された穴の周囲に応力集中に起因する降伏域が形成されるからである。これにより、残留応力場が乱されることになる。二番目に、トレパニング過程で付加的な降伏が起きるため、完全に弾

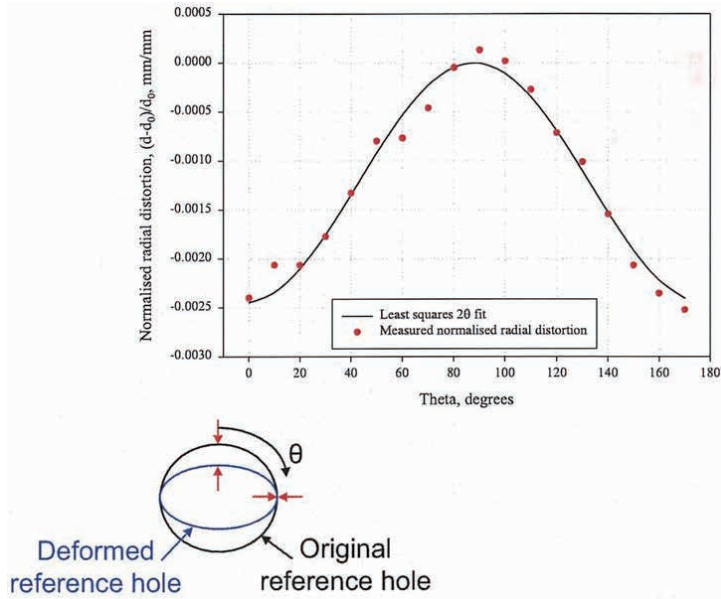


図5 穴径変化測定データの最小二乗法による処理⁽³⁾

性除荷されるという仮定が成り立たなくなるからである。塑性の効果を考慮するため、一定の深さでトレパニングを中断し、この状態で穴の変形を測定することが提案されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これによる穴の直径変化の解析から、残留応力の再配分後の弾性変形が捉えられることが発見されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

この弾性変形は、その後、式(10)で表される標準的な弾性解析に適用される。このトレパニング技術は、段階的なトレパニング深さ位置（各深さ位置での穴直径を d_j 、 j を段階的トレパニングステップの順番とする）に対して、順次、穴変形の測定結果を得ることによるものである。直径の変化は無次元化すると、 j 番目のトレパニング位置では、 $\tilde{\epsilon}_j = (d - d_{0j})/d_{0j}$ で表される。

iDHD法の測定手順は2章のDHD法とStep 2までは同様であるが、Step 3以降を簡略化して以下に列記する。

- 一番目の深さまでトレパニングし、コアの軸方向変形を測定する。
参照孔の直径を円周方向および深さ方向に再測定する。
- 二番目の深さまでトレパニングし、コアの軸方向変形を測定する。
参照孔の直径を円周方向および深さ方向に再測定する。
- 三番目の深さまでトレパニングし、コアの軸方向変形を測定する。
参照孔の直径を円周方向および深さ方向に再測定する。
-
-
-
- 最終深さ（貫通）までトレパニングし、コアの軸方向変形を測定する。
参照孔の直径を円周方向および深さ方向に再測定する。

上記の最終トレパニングが通常のDHD法に他ならない。iDHD法は計画した段階数の測定が必要なため、非常に時間を要することがわかる。

上記の手順により、トレパニングの段階数に対応して参照孔軸方向の有限数の測定結果が得られる。各トレパニングで測定された穴変形から、DHD解析手順の式(10)を介して、各トレパニング位置での面内応力成分を得ることができる。その後、DHD法によるデータとの比較および組み合わせにより最終的な測定結果が得られる。

DHD法に対する塑性の影響を例示するため、A.H. Mahmoudi等によって中実円筒に作用する応力の再現をシミュレートするFEMモデルが開発された⁽⁵⁾。図6にその結果を示すが、再現誤差は降伏点に対して無次元化した負荷応力の関数として示されている⁽²⁾。負の誤差は、測定された残留応力が実際の残留応力より低いことを意味する。DHD計算は、負荷応力の大きさが小さいときは正確であるが、無次元負荷応力 (σ_0/σ_y) が約0.5より大きいときは不正確である。iDHD計算は、負荷応力が低い（約0.1）ときは新たな誤差を生じる。しかし、iDHD計算の精度は、負荷応力の大きさが高い場合はDHD計算に比べてはるかに

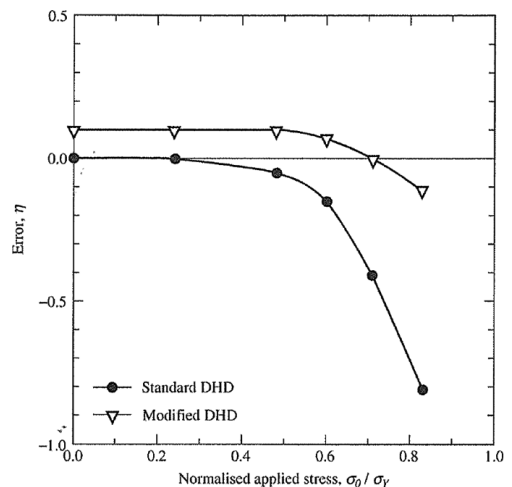


図6 DHD法およびiDHD法の無次元負荷応力に対する誤差（誤差は $\eta = \sigma_m/\sigma_0 - 1$ と定義）⁽²⁾

高い。

一例として、SUS316製の円柱（直径60mm×高さ60mm）を850℃で加熱し、20℃に水焼き入れたときの円柱中心部の残留応力をFEMで解析するとともに、DHD法、iDHD法およびNeutron diffraction（中性子回折法）で測定した事例について紹介する⁽³⁾⁽⁴⁾。

図7は測定の様子を示したもので、このケースではコアの軸方向ひずみ解放をモニタリングするためにLVDT（差動変圧器）がセットされている。iDHD法では、約5mmごとに、DHD法では0.2mmごとに測定が実施された。図8に半径方向の残留応力について、両者の測定結果を示す。同図には中性子回折法による測定結果と、FEMによる解析結果も示されている。図9にABAQUS Codeにより、8節点軸対称要素を用いたFEM解析を実施し、深さ24mmまでトレパニングした状態をシミュレーションした結果を示す。

図8から、iDHD法は、DHD法では測定できなかった応力の対称性を明確に捉えていることがわかる。また、iDHD法による測定結果は、中性子回折法による結果と非常に良く一致している。図9では、トレパニングの先端部のコア部の応力が高

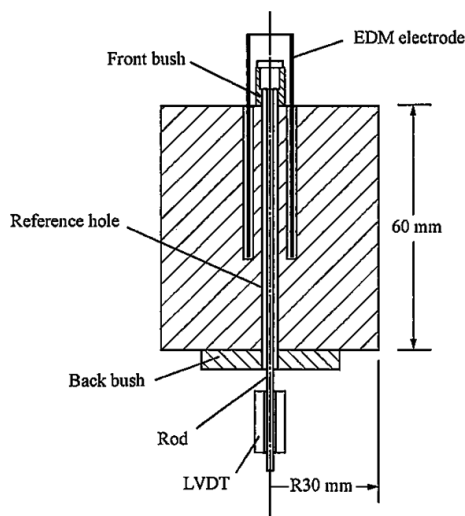


図7 水焼き入れされた円柱のDHD測定の様子⁽⁴⁾

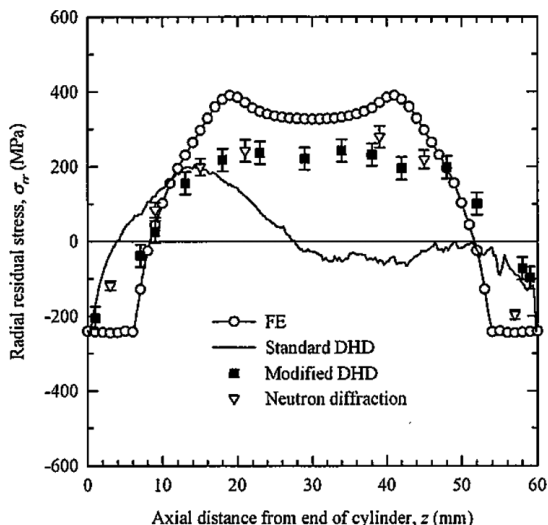


図8 水焼き入れされた円柱の残留応力測定結果とFEM解析結果の比較⁽⁴⁾

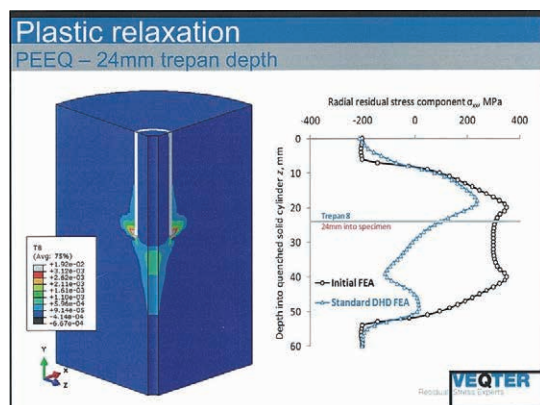


図9 水焼き入れされた円柱のiDHDシミュレーション⁽³⁾

く、塑性が起きている様子が明確に示されている。

4. おわりに

IIC REVIEW No.42でDHD法の測定原理、測定事例などについて概要を紹介したが、その後、塑性の影響を考慮した改良DHD（iDHD）法の技術が確立されている。今回は、iDHD法を含めてDHD法の測定原理などについてやや詳しく解説した。

近年、Contour法と呼ばれる切断法とFEMを組

み合わせた斬新な残留応力測定技術が登場している⁽⁸⁾。FEMとの組み合わせにより、切断面に垂直方向の残留応力の2次元マップが得られるというメリットがあるが、この技術も弾性応力解放に基づく方法であり、塑性の影響を受ける。存在する残留応力が高い（降伏点の80%以上）場合は、測定結果には大きな誤差が含まれるのが欠点である。このようなケースには現時点ではiDHD法を適用するのが最良と考えられるが、Contour法のような2次元的な結果を得るためには多点測定が必要となる。

残留応力が降伏点を超えないと予想される場合は、測定深さ、測定点数、予算などに応じて、穿孔法⁽⁹⁾、DHD法およびContour法から適切な方法を適用することを推奨する。

参考文献

- (1) 三上隆男：DHD 残留応力測定法について、IIC REVIEW、No.42、2009/10、pp.19-26
- (2) D.J. Smith：Deep Hole Drilling, Chapter 3 in Practical Residual Stress Measurement Methods, G. S. Schajer, (ed.), Wiley-Blackwell, 2013, pp.65-87
- (3) VEQTER Ltd.：RESIDUAL STRESS WORKSHOP, Sept. 2011, University of Bristol, UK
- (4) A.H. Mahmoudi, S. Hossain, C.E. Truman, D.J. Smith, M.J. Pavier：A New Procedure to Measure Near Yield Residual Stresses Using the Deep Hole Drilling Technique, Experimental Mechanics, 2009, 49：pp.595-604
- (5) A.H. Mahmoudi, C.E. Truman, D.J. Smith, M.J. Pavier：The effect of plasticity on the ability of the deep hole drilling technique to measure axisymmetric residual stress, International Journal of Mechanical Sciences, 2011, 53：pp.978-988
- (6) A.H. Mahmoudi, D.J. Smith, C.E. Truman, M.J. Pavier：Effect of Gauge Volume on The Residual Stress Measurement Using Deep Hole Drilling Technique, PVP2010-25460
- (7) S. Timoshenko and J.N. Goodier：Theory of Elasticity, 2nd edition, 1951, pp.258-280 (McGraw-Hill, New York)
- (8) 三上隆男、鈴木優平：Contour法による残留応力測定技術、IIC REVIEW、No.56、2016/10、pp.2-11
- (9) 三上隆男、松田昌悟：穿孔法による残留応力測定について（その2）、IIC REVIEW、No.49、2013/04、pp.39-45



フェロー 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、JSNDI ひずみ測定・レベル3
明星大学理工学部非常勤講師

三上 隆男

TEL. 03-6404-6583

FAX. 03-6404-6044