

穿孔法による残留応力測定技術の検証試験 (厚肉試験体の場合)

三上 隆男^{*1} 松田 昌悟^{*2} 鈴木 優平^{*3} 高久 泰弘^{*4}
Mikami Takao Matsuda Masanori Suzuki Yuhei Takaku Yasuhiro

IIC REVIEW No.50 では、ASTM E837-08 規格（穿孔ひずみゲージ法による残留応力測定法）の均一応力を受ける薄肉試験体に関する規定にしたがって、SM490 製の薄肉平板試験体に既知の均一応力を負荷し、貫通穿孔により解放されたひずみから解析した残留応力と既知の負荷応力とを比較した結果について報告した。

本号では、均一応力を受ける厚肉試験体に関する規定にしたがって、SM490 製の厚肉平板試験体に既知の均一応力を負荷し、ブラインド穿孔により段階的に解放されたひずみから解析した残留応力と既知の負荷応力とを比較した結果について述べる。

キーワード：残留応力測定、穿孔法、ひずみ解放、ロゼットひずみゲージ、穿孔装置、X 線回折法、ASTM E837 規格

1. はじめに

残留応力の発生原因は、材料の熱処理、鍛造、溶接、ショットピーニング、圧延などである。残留応力の影響は、その大きさ、符号（正か負か）に依存して、有益か不利益かのどちらかになる。意図的に圧縮の残留応力を発生させて疲労強度や疲労寿命の改善を図る場合があるが、一般的に、意図しない残留応力は有害であり、供用応力が残留応力に重畳した場合、疲労や構造的な損傷の要因となることがある。そのため、残留応力の測定が必要となり、種々の方法で測定されている。

現在、世界的に使用されている残留応力の測定方法を図 1 に示す。測定方法は、非破壊法、準非

破壊法および完全破壊法に大別できる。

IIC は切断法、X 線回折法、穿孔法（Center Hole Drilling）および DHD（Deep-Hole Drilling）法の技術を有している（図 1 でピンク着色表示）。

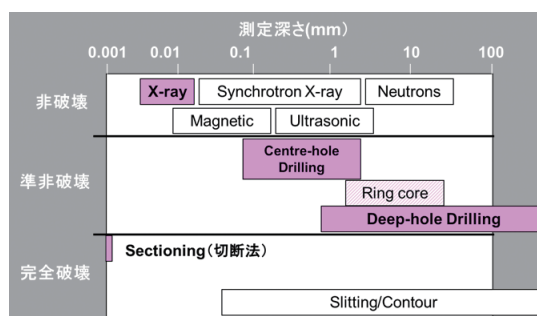


図 1 残留応力の測定方法

*1：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、JSNDI ひずみ測定 レベル 3

*2：計測事業部 計測技術部 部長

*3：計測事業部 計測技術部

*4：計測事業部 材料試験部 福浦グループ

残留応力測定については、ASTM E837 規格で穿孔法が規定されている⁽¹⁾⁽²⁾。

この方法は、小型ドリルを使って表面から1～2mmの深さまで、 $\phi 2\text{mm}$ 程度の穴を穿孔する際に、解放されるひずみを穴周囲に接着したロゼットひずみゲージを用いて測定し、その解放ひずみから穴領域に存在していた残留応力を解析する技術である。

IICはS社（イタリア）から最新の穿孔装置（RESTAN 3000）を導入し、2013年から本格的に残留応力測定サービスを行っている。

ASTM E837 規格では測定対象物の肉厚や応力状態に応じて、以下の3種類の場合について規定している。

- ①薄肉で深さ方向に均一な応力分布を有する場合（貫通穿孔測定）
- ②厚肉で深さ方向に均一な応力分布を有する場合（ブラインド穿孔測定）
- ③厚肉で深さ方向に不均一な応力分布を有する場合（ブラインド穿孔測定）

IIC REVIEW No.50では、①の規定にしたがって、薄肉平板試験体を対象として均一応力条件下で貫通穿孔試験を行った結果、測定残留応力と既知の負荷応力とは概ねよく一致し、IICの穿孔法による残留応力測定技術の妥当性を検証することができた⁽³⁾。

本稿では、②の規定にしたがって、厚肉平板試験体を対象として均一応力を負荷した状態でブラインド穿孔試験を行った結果について報告する。

2. 穿孔装置の概要

使用した穿孔装置はASTM E837-08 規格で規定されている深さ方向に不均一な応力分布測定に対応できるように穿孔深さ分解能： 0.001mm を有している。同規格の要求は「 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内で穿孔深さを制御できること」であるが、それより10倍高い分解能である。このように、本穿孔装置は深さ方向に精密な穿孔が可能のため、Incremental Center Hole Drilling (ICHHD) と呼ばれている。穿孔ドリルは約400,000rpmの高速エアタービンで駆動され、ステッピングモーター制御により、任意に設定した条件（穿孔ステップ数と深さ増分）で自動的に穿孔する。穿孔にともない解放されるひずみは穿孔ステップ毎にデジタル静ひずみ計（HBM社製 Spider 8）により自動的に測定し、試験後にASTM E837-08 規格対応の専用のソフトウェアを用いて残留応力を解析する。図2に穿孔部の拡大写真を示す。また、穿孔システム全体の写真を図3に示す。

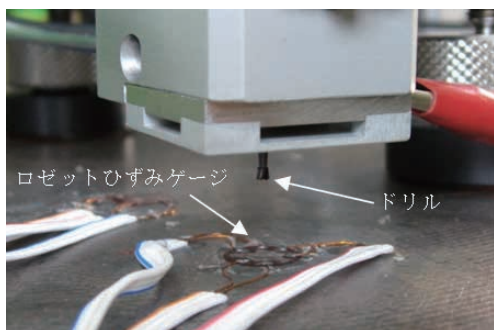


図2 穿孔部の拡大写真



図3 穿孔システム全体

3. ブラインド穴解析⁽⁴⁾⁽⁵⁾

穿孔法は、均一な平面応力を受ける薄肉の幅広平板を貫通して穿孔された小孔に基づく理論を背景として開発されたものである。しかし、残留応力測定が必要とされる通常の機械部品や構造部材は任意のサイズと形状を有し、薄肉で平らであることは稀である。したがって、穿孔法測定では、ほとんどのケースでブラインド穴が用いられる。なお、“ブラインド穴”とは貫通穴ではなく、通常は表面から深さ 2.0mm までを解放ひずみ測定を実施しながら段階的に穿孔する穴であり、厚肉試験体に適用される。

平面応力場にブラインド穴を穿孔すると、非常に複雑な応力状態となり、正確な解は弾性理論からは得ることができない。しかし、幸いなことに、Rendler と Vigness により、ブラインド穴まわりの応力分布は貫通穴の場合と非常に類似することが実証されている。

ブラインド穴を穿孔することによる解放ひずみは、穴と同心の円弧に沿って \sin 関数的に変化する。適切な校正定数 \bar{a} 、 \bar{b} を用いれば、薄肉板のデータ換算関係式はブラインド穴にも適用できる。これらの係数は理論的な考察から直接的に計算できないので、実験的な手段である実験校正または有限要素法解析のような数値解析により得る必要がある。数名の研究者が、ブラインド穴の残留応力解析について有限要素法による研究結果を発表している。Schajer により開発された係数は ASTM E837 規格に取り込まれているが、それによるとブラインド穴の校正定数の方が貫通穴の校正定数よりもやや大きい。

4. 厚肉平板の残留応力測定試験の内容

本試験では、SM490 製の厚肉平板試験体に 1 軸引張荷重を負荷することにより既知の均一応力場を与え、ブラインド穿孔時の解放ひずみを測定し、ASTM E837-08 規格の計算式と校正定数を用いて穴領域の残留応力を求めた。また、X 線回折法による測定も併せて実施した。これらの測定残留応力と既知の負荷応力とを比較し、厚肉試験体の穿孔法による残留応力測定技術を検証した。

4.1 試験体

試験体は ASTM E837-08 規格で規定されている“厚肉”の条件を満足する肉厚とする必要がある。試験体の肉厚を t 、ロゼットひずみゲージのゲージ円直径を $D (=2R)$ とすると、タイプ A ゲージの場合は、 $t \geq 1.2D$ を満足する必要がある。本試験では $D = \phi 5.14\text{mm}$ のゲージを採用したので、 $t = 10\text{mm}$ とした。

試験体の材質は SM490 (溶接構造用圧延鋼材) で、幅 25mm、長さ 390mm とした。また、試験体の機械加工などにより生じ得る初期残留応力をできるだけ小さくするため、機械加工後に応力除去処理：SR (600°C × 2Hr) を行った。

4.2 試験方法

4.2.1 初期残留応力の測定

試験体を引張試験機に設置する前に図 4 に示す B 点を穿孔法で測定し、 X_0 点および X_1 点 (両方とも試験体の裏側) を電解研磨 ($\phi 6\text{mm} \times$ 深さ 0.2mm) 後に X3000 (Stresstech 社製の X 線残留応力測定装置) で測定する。

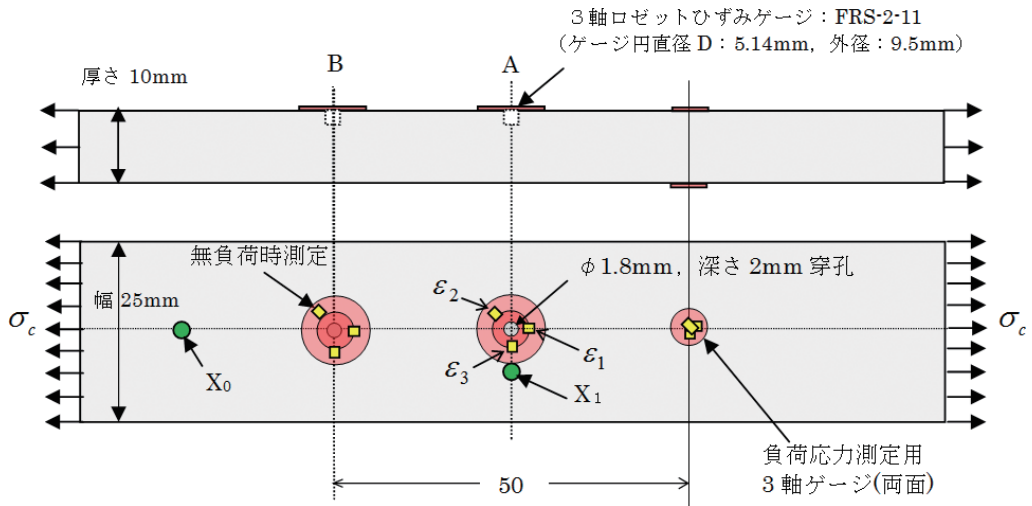


図4 厚肉平板試験体 (390L×25b×10t) の一軸引張試験

4.2.2 1 軸引張試験

下記の順序で試験を実施する。

(1) 試験体を引張試験装置にセットし、穿孔装置と X3000 を仮設置した後、X3000 により、 X_0 点と X_1 点の初期残留応力を測定する。その後、負荷応力 σ_c を与えるため荷重 P (25 ~ 50kN) を徐々に負荷する。なお、負荷応力測定用ひずみゲージは試験が終了する (5) まで連続測定する。

(2) 所定の負荷応力 σ_c に到達したら、X3000 で X_1 点の応力を測定する。(穿孔前)

(3) 負荷応力 σ_c が負荷された状態で、穿孔装置を横方向に設置してロゼットひずみゲージと穿孔ドリルのセンターリング調整を行った後、穿孔を開始する。

1 ステップの穿孔深さを 0.05mm として 40 ステップの穿孔を行い、各ステップで解放ひずみ ε_1 、 ε_2 、 ε_3 を測定する。最終穿孔深さは 2.0mm (=0.05×40) となる。解放ひずみ測定終了後、実際に穿孔された穴径 (D_0) と偏芯量を穿孔装置の顕微鏡で測定する。

(4) 負荷応力 σ_c が負荷された状態で、X3000 で

X_1 点の応力を再度測定する。(穿孔後)

(5) 荷重を除荷し、X3000 で X_1 点を測定した後に試験体を取り外す。

(6) σ_c は 2 種類 (100MPa、200MPa) とし、(1) ~ (5) は試験体を変えて 2 回実施する。

(7) 測定されたひずみと、ASTM E837-08 規格で規定されている均一応力場の校正係数を使って、穴の位置に元々存在していた残留応力を計算し、これと σ_c を比較する。また、X3000 の測定結果と σ_c を比較する。

5. 試験結果

試験体は 2 体用意し、負荷応力： σ_c は 2 ケース (100MPa、200MPa) について試験した。

5.1 材料の機械的性質

ケース 1 の試験で 3 軸ゲージから得られたひずみデータと荷重データ (負荷応力に対応) から材料である SM490 のヤング率： E とポアソン比： ν を求めた。その結果、 $E=211\text{GPa}$ 、 $\nu=0.3$ が得られたので、以後の解析ではこれらの値を用いた。

5.2 初期残留応力の測定結果

ICHD により、試験体 2 体について負荷試験前に B 点を $\phi 1.6\text{mm}$ のドリルを用いて 0.050mm の深さ増分で 40 ステップの穿孔（穿孔深さは合計で $0.050 \times 40 = 2.0\text{mm}$ ）を行い、各ステップで解放ひずみを測定した後、残留応力を解析した。次に、 X_0 点を電解研磨（ $\phi 6\text{mm} \times$ 深さ 0.2mm ）した後、X3000 により試験体の長手方向（ x 方向）の残留応力を測定した。

表 1 に B 点（穿孔法）と X_0 および X_1 点（X3000）の初期残留応力測定結果を示す。なお、穿孔法の測定値は ASTM E837-08 規格の均一応力理論による解析結果を示し、X3000 の測定値の（ ）内の値は信頼性限界を示す。なお、信頼性限界とは $\sin^2\psi$ 法による応力解析の際の回帰直線に対する誤差範囲（ $\pm 1\sigma$ ）である。

表 1 から SR 処理を行っても残留応力が存在していることがわかる。著者等の経験では、機械加工により付与された残留応力は SR 処理しても完全には除去されない。また、穿孔法と X3000 の測定結果が相違するが、その原因として以下の 2 点が考えられる。

- ・ 両者の測定場所や測定応力方向が相違する。
- ・ 穿孔法の測定結果は深さ $0 \sim 2\text{mm}$ の平均値であるのに対して、X3000 は電解研磨しているので、深さ $0.2\text{mm} + X$ 線浸透深さ（ 0.01mm 程度）の局所的な測定値である。

5.3 1 軸引張試験による残留応力測定結果

5.3.1 試験状況

図 5 に引張試験機（ねじ式 AG-IS 型^{たて}：最大荷重能力 100kN ）による厚肉試験体の 1 軸引張試験の様子を示す。厚肉試験体は上下のチャックで垂直方向に保持されており、各種ひずみゲージからのリード線はデータロガーおよび ICHD システムのデジタル静ひずみ計（HBM 社製 Spider 8）に接続されている。

穿孔作業は厚肉試験体が引張試験機に設置された状態で実施する必要があるため、図 6 に示すように ICHD は横置きとした。ICHD の 3 つの脚には強力磁石が装備されており、この磁石を利用することにより横置きが可能となっている。

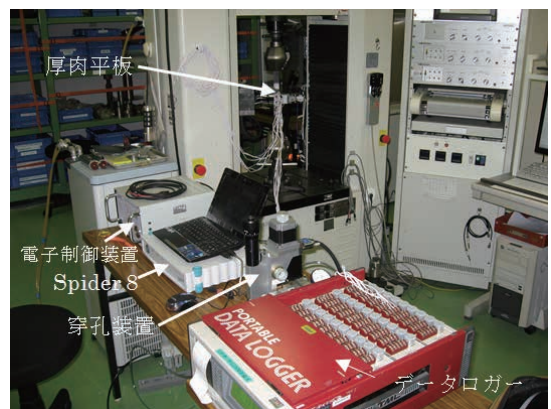


図 5 試験の様子

表 1 初期残留応力測定結果

Case No.	穿孔法による B 点の測定結果 (MPa)	X3000 による測定結果 (MPa)	
		X_0	X_1
1	$\sigma_{\max} = -9.7, \sigma_{\min} = -12.4$	$\sigma_x = 6.7 (\pm 5.3)$	$\sigma_x = -3.0 (\pm 12.4)$
2	$\sigma_{\max} = -8.3, \sigma_{\min} = -13.0$	$\sigma_x = -33.3 (\pm 22.9)$	$\sigma_x = -8.8 (\pm 15.6)$
3	$\sigma_{\max} = -13.0, \sigma_{\min} = -15.4$	$\sigma_x = 12.8 (\pm 28.5)$	$\sigma_x = 7.4 (\pm 29.5)$

() 内の数値は信頼性限界を示す

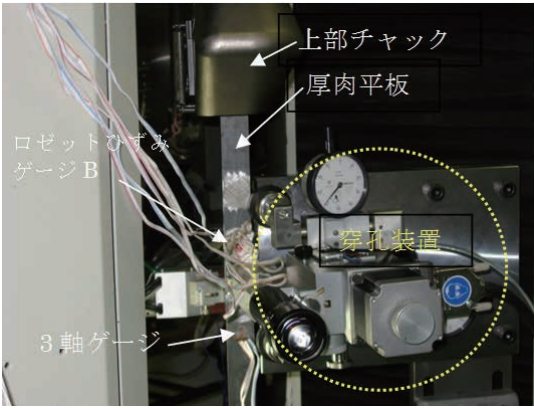


図6 穿孔装置 (ICHD) の設置

図7にケース1(100MPa)用の試験体に接着したロゼットひずみゲージの写真を示す。上部のゲージBは4.2項で述べた初期残留応力測定用で、

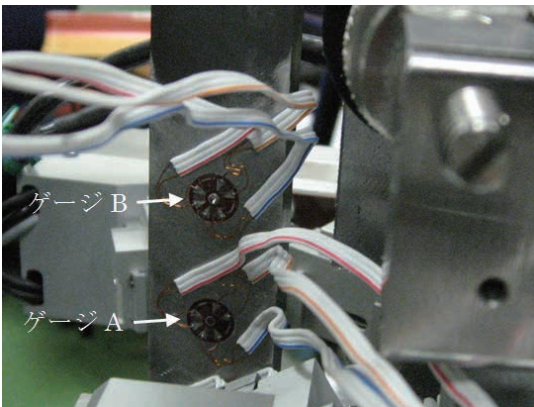


図7 ロゼットひずみゲージ (100MPa 試験体)

既に中心部が穿孔されている。下部のゲージAは1軸引張試験用で、穿孔前の状態である。これらは、ASTM E837-08規格で規定されたType Aのゲージ(ゲージ円直径 $D=\phi 5.14\text{mm}$)である。図8は穿孔後のロゼットひずみゲージの状況である。 $\phi 1.795\text{mm}$ の穴が 0.05mm ステップで深さ 2.0mm まで穿孔されている。

5.3.2 解放ひずみ測定結果

図9および図10に、それぞれケース1(100MPa)、ケース2(200MPa)試験時の解放ひずみ測定結果を示す。解放ひずみは負荷応力に比例し、後者は前者の約2倍となっている。



図8 穿孔後のロゼットひずみゲージ

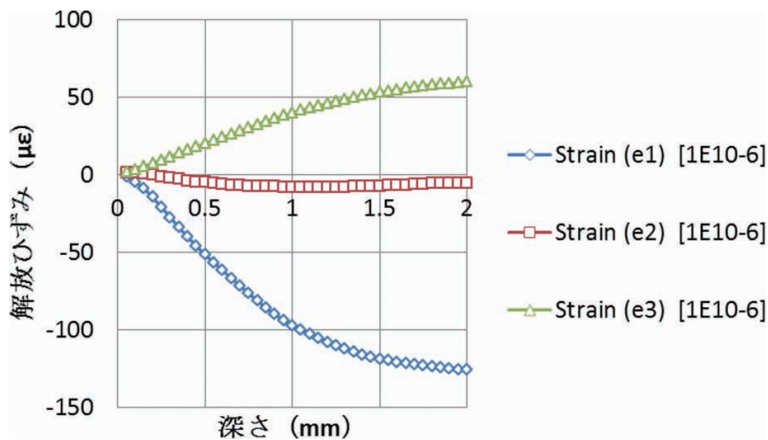


図9 解放ひずみの測定結果 (100MPa 試験体)

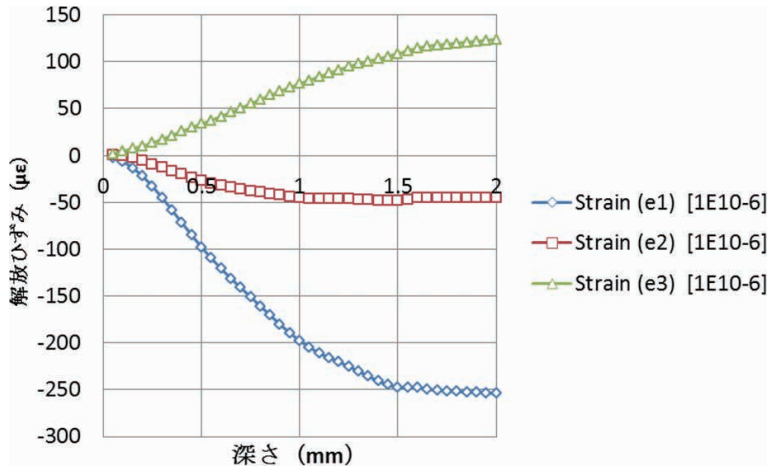


図 10 解放ひずみの測定結果 (200MPa 試験体)

5.3.3 応力均一性の評価

ASTM E837-08 規格では、その 9.2 項で残留応力（ここでは負荷応力に相当）が穴深さ方向に均一であることを検証するために、以下のように評価手順を定めている。

まず、各ステップで測定されたひずみ ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 に対して以下の組合せひずみを計算する。

$$p = (\epsilon_3 + \epsilon_1) / 2 \quad (1)$$

$$q = (\epsilon_3 - \epsilon_1) / 2 \quad (2)$$

$$t = (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2) / 2 \quad (3)$$

組合せひずみ p の各セットと、 q か t の絶対値が大きい方のセットを最大穴深さ位置における値に対するパーセントで表す。穴深さに対して、これらのパーセントひずみをプロットする。このグ

ラフの理論的な形状が規格で与えられており、これから $\pm 3\%$ 以上離れる場合は、材料厚さ方向の応力不均一またはひずみ測定誤差のどちらかが原因であるとしている。

図 11 および図 12 に、それぞれケース 1 (100MPa) とケース 2 (200MPa) の評価結果を示す。

これらの図は実測の p と q および ASTM E837-08 規格で規定している基準の p と q 、さらに両者の差異を穴深さ比 (0.5 ピッチで 8 点) に対してパーセントで表示している。ただし、 h は穴深さ位置を、 D はゲージ円直径を示す。ケース 1、2 も穴深さ比が 0.2 (深さ約 1.0mm に相当) 以下では差異は 3% を超えるものの 0.2 以上では差異は 3% より小さく、ほぼ規格の均一応力を満足していると言える。1 軸引張で試験

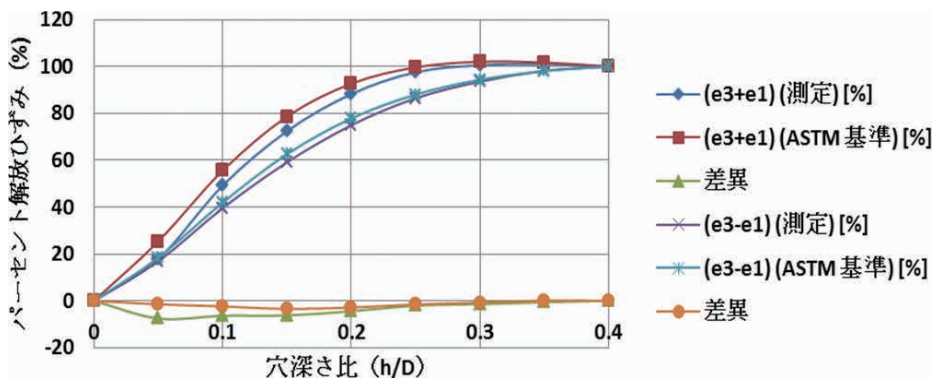


図 11 パーセント解放ひずみのプロット (100MPa 試験体)

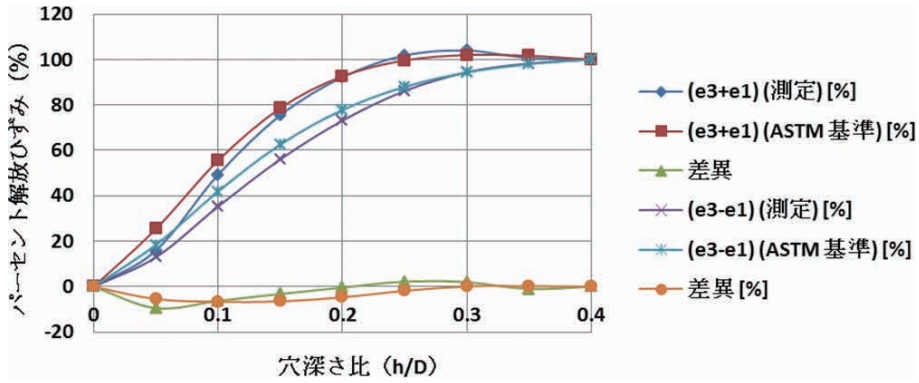


図 12 パーセント解放ひずみのプロット (200MPa 試験体)

しているの、試験体は均一応力状態となり、3%以下となるはずであるが、穴深さ比 0.2 以下で 3%以上の差異が生じている。これは、5.2 項で述べた初期残留応力が負荷応力に重畳しているためと考えられる。

5.3.4 均一応力解析の手順

8 セットの ε_1 、 ε_2 、 ε_3 測定に対応する各穴深さに対し、規格の Table 3 を用いて穴深さと直径および使用されたロゼットひずみゲージ型式に対応する校正定数 \bar{a} と \bar{b} の数値を決定する。この Table 3 の数値は、有限要素法解析から導かれている。

3 組の組合せひずみ p 、 q 、 t に対応する 3 つの組合せひずみ P 、 Q 、 T を次の公式を用いて計算する。

$$P = -\frac{E}{1+\nu} \frac{\sum(\bar{a} \cdot p)}{\sum(\bar{a}^2)} \quad (4)$$

$$Q = -E \frac{\sum(\bar{b} \cdot q)}{\sum(\bar{b}^2)} \quad (5)$$

$$T = -E \frac{\sum(\bar{b} \cdot t)}{\sum(\bar{b}^2)} \quad (6)$$

ここで、 Σ は 8 つの穴深さに対する指示量の合計を示す。

組合せ応力 P 、 Q 、 T の評価は、ただ一組の ε_1 、 ε_2 、 ε_3 測定、例えば最大穴深さでの値で可能である。しかし、全てのひずみ測定データを使用するとランダム測定誤差の影響を大いに減少させることができるので、上記の平均法を採用した。

応力 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} と主応力 σ_{\max} 、 σ_{\min} および主応力方向 β は次式で計算できる。

$$\sigma_x = P - Q \quad (7)$$

$$\sigma_y = P + Q \quad (8)$$

$$\tau_{xy} = T \quad (9)$$

$$\sigma_{\max}, \sigma_{\min} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{-T}{-Q}\right) \quad (11)$$

5.3.5 残留応力解析結果

表 2 に 5.3.4 項で述べた ASTM E837-08 規格の均一応力解析手順に基づいた A 点の解析結果を示す。負荷応力は試験機のロードセルで実測した値を表示している。試験体の両面に貼り付けた 3 軸ゲージにより試験体に曲げ応力が加わっていないことが確認されている。 σ_{\max} は負荷応力に一致していないが、これは初期残留応力の影響と考えられる。A 点は負荷試験時の測定点のため、無負荷時に穿孔することができないので初期残留応力は不明である。そこで、B 点の x 方向初期残留応力測定値 σ_x を A 点での値と仮定し、この初期残留応力を考慮して合計の応力： $\sigma_{tot} = \sigma_{\max} - \sigma_x$ を計算した。その結果、 σ_{tot} は両ケースとも負荷応力に対して約 -5% の誤差でほぼ一致している。ただし、初期残留応力の値は試験体の場所により異なり、A 点での真の値が不明なので、本評価は参考用と

表 2 A 点の残留応力測定結果

Case No. (Applied stress)	ICHHD								
	D (mm)	D ₀ (mm)	D ₀ /D	σ_{\max} (MPa)	σ_{\min} (MPa)	β (°)	Initial stress: σ_x (MPa)	Total stress: σ_{tot} (MPa)	Error (%)
Case 1 (98MPa)	5.14	1.795	0.3492	85.8	-17.3	-8.3	(-7.0)	(92.8)	(-5.3)
Case 2 (197MPa)	5.14	1.775	0.3453	174.4	-30.5	-3.2	(-13.9)	(188.3)	(-4.4)

し、() 書きとしている。1 軸負荷試験なので、 σ_{\min} は理論的にはゼロであるが、初期残留応力の影響などによりゼロとはなっていない。

5.3.6 X3000 による残留応力測定結果

表 3 に X3000 による X₁ 点の測定結果を示す。測定結果は穿孔法と比べると両ケースとも低い値となっているが、5.3.5 項で述べたように穿孔法と X3000 の測定位置と深さの違いなどに起因するものと考えられる。

6. 考察

5 章で述べたように、試験体には初期残留応力が存在し、それが負荷試験時の測定残留応力と実際の負荷応力との比較の際の誤差要因となっている。5.2 項の穿孔法による初期残留応力は ASTM E837-08 規格の均一応力理論に基づいて解析したものであるが、100MPa および 200MPa 用試験体の B 点について不均一応力理論⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁶⁾に基づいて解析した結果を図 13 および図 14 に示す。不均一

表 3 X₁ 点の残留応力測定結果 (X3000)

Case No. (Applied stress)	X3000			
	Initial stress : σ_x (MPa)	When the uniaxial stress is applied (MPa)	Total stress: σ_{tot} (MPa)	Error (%)
Case 1 (98MPa)	-12.9 (±18.6)	65.5 (±6.3)	78.4	-20.0
Case 2 (197MPa)	-18.4 (±14.1)	163.5 (±10.7)	181.9	-7.7

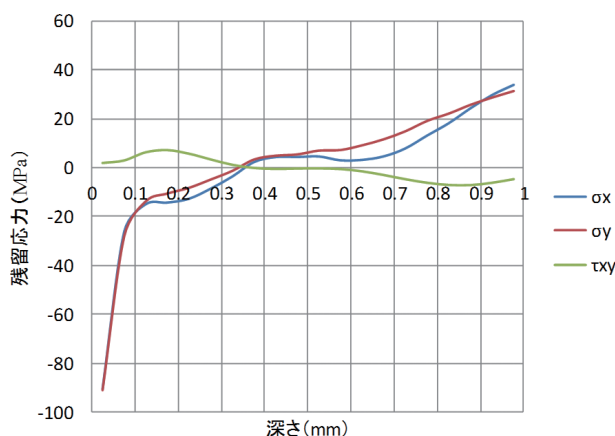


図 13 B 点の深さ方向初期残留応力分布 (100MPa 試験体)

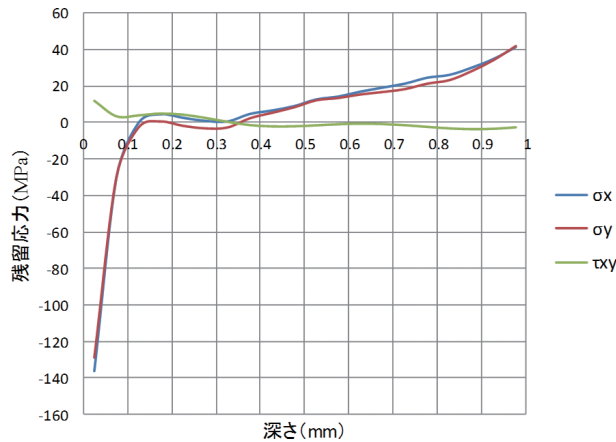


図 14 B 点の深さ方向初期残留応力分布 (200MPa 試験体)

応力分布は深さ 1.0mm まで解析することができるので、同図には表面から深さ 1.0mm までの応力分布が表示されている。両者の分布は類似しており、表面近傍で圧縮の最大値を示しているが、深さ約 0.35mm から引張に転じている。

このように、少なくとも深さ 1.0mm までの不均一な初期残留応力が均一応力場を乱し、図 11 および図 12 における $h/D=0 \sim 0.2$ の範囲での乱れ (規格はずれ) の原因となり、深さ約 1mm 以上の深層部では均一応力 (= 負荷応力) になっているものと考えられる。

結論として、試験体の初期残留応力が十分小さければ ASTM E837-08 規格の理論に非常に良く一致すると考えられ、ブラインド穿孔による均一応力場の残留応力測定法の信頼性を実証することができた。ただし、5.2 項で述べたように試験体は一般的に機械加工されており、SR 処理しても残留応力を完全には除去することができないので、表面からある程度の深さまでは均一応力の条件を満たさない場合が多いと考えられる。したがって、最新の ASTM E837-13a 規格が推奨しているように、測定対象物が深さ方向に不均一な応力分布を有していることを前提とし、深さ 1.0mm まで 0.05mm 毎に解放ひずみを測定することが望ましい。

7. おわりに

SM490 製厚肉平板試験体 (厚さ 10mm) に 1 軸引張荷重を負荷することにより既知の均一応力場を与え、ブラインド穿孔により段階的に解放ひずみを測定し、ASTM E837-08 規格の計算式と校正定数を用いて残留応力を計算した。その結果、試験体内に存在する初期残留応力を考慮すると測定残留応力と既知の負荷応力とはよく一致し、IIC の穿孔法による残留応力測定技術の妥当性を検証できた。

なお、ASTM E837-08 規格は 2013 年に改定され、ASTM E837-13a 規格となった。主な改定内容は本稿で解説した厚肉均一応力場に関するもので、穿孔深さは 1.0mm に変更され、降伏応力の 80% 以下の応力測定値が有効とされている。また、%ひずみのチェック条項は削除された。

素材や工業製品の表面付近の残留応力は深さ方向に均一であることは稀であり、ほとんどが深さ方向に不均一であると考えられる。そのような実情を考慮して 2013 年の改定で上述のように均一応力場の規定が簡素化されたものと考えられる。したがって、ASTM E837-08 または 13a 規格の深さ方向に不均一な応力分布を有する厚肉板の応力

測定法（ブラインド穴測定）の規定がますます重要になっている。今後、この規定に準拠した試験を実施する予定である。

参考文献

- (1) ASTM E 837-08, “Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method”, 2008
- (2) ASTM E 837-13a, “Standard : Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method”, 2013
- (3) 三上隆男、松田昌悟、高久泰弘：穿孔法による残留応力測定技術の検証試験（薄肉試験体の場合）、IIC REVIEW、No.50、2013/10、pp.39-45
- (4) Technical Note TN-503-6, “Measurement of Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gauge Method”, Vishay Measurement Group, 2010
- (5) 三上隆男：穿孔法による残留応力測定について（その1）、IIC REVIEW、No.48、2012/10、pp.53-65
- (6) 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
- (7) 三上隆男、松田昌悟、高久泰弘、鈴木優平：穿孔ひずみゲージ法による残留応力測定技術（その2）、平成26年度火力原子力発電大会研究発表要旨集、pp.70-71



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、JSNDI
ひずみ測定レベル3

三上 隆男

TEL. 03-6404-6583
FAX. 03-6404-6044



計測事業部
計測技術部
部長

松田 昌悟

TEL. 045-791-3518
FAX. 045-791-3542



計測事業部
計測技術部
鈴木 優平

TEL. 045-791-3518
FAX. 045-791-3542



計測事業部
材料試験部
福浦グループ
高久 泰弘

TEL. 045-791-3518
FAX. 045-791-3542