

# 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)

三上 隆男<sup>\*1</sup> 松田 昌悟<sup>\*2</sup> 高久 泰弘<sup>\*3</sup>  
*Mikami Takao      Matsuda Masanori      Takaku Yasuhiro*

これまで、穿孔法の基礎理論について、2回に分けて解説<sup>(5)(6)</sup>してきた。本稿ではSM490製薄肉平板を対象としてASTM E837-08規格(穿孔ひずみゲージ法による残留応力測定法)で規定されている方法にしたがって測定および解析を行っ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線法

## 1. はじめに

ASTM E837-08規格<sup>(1)</sup>では、穿孔法による残留応力測定に関して、応力が深さ方向に“均一”または“不均一”な場合について規定している。また、測定対象物は“薄肉”または“厚肉”とし、“薄肉”の場合は均一応力のみ測定法を規定している。

本試験では、SM490製薄肉平板試験体に1軸引張荷重を負荷して既知の均一応力場を与え、貫通穿孔前後のひずみ変化から穿孔による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の位置の残留応力を求めた。また、X線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検討し、IICの穿孔法による残留応力測定技術の検証を行った。

## 2. 穿孔法の基礎理論

残留応力を有する物体に穴をあけると、その位置で応力が解放されて穴近傍の応力分が変化する。これはMatharが最初に提案した穿孔法の基礎

となる原理である<sup>(2)</sup>。

実際には、**図1**に示すように穴の周囲に配置された特殊なロゼットひずみゲージにより、穿孔にともなう半径方向の部分解放ひずみを3箇所測定する。残留応力が肉厚方向に均一に分布する薄肉板を貫通する穴のような単純ケースに対しては、測定された解放ひずみから弾性理論に基づいて残留応力を直接計算することができる。

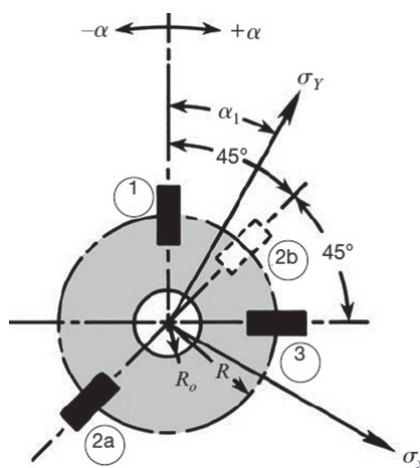


図1 ロゼットひずみゲージの配置<sup>(4)</sup>

\*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 材料試験部

図2の上図(a)は、均一残留応力、 $\sigma_x$ を受ける薄板内のある局所的な領域を示している。任意の点 $P(R, \alpha)$ の初期応力状態は極座標で表すことができる。

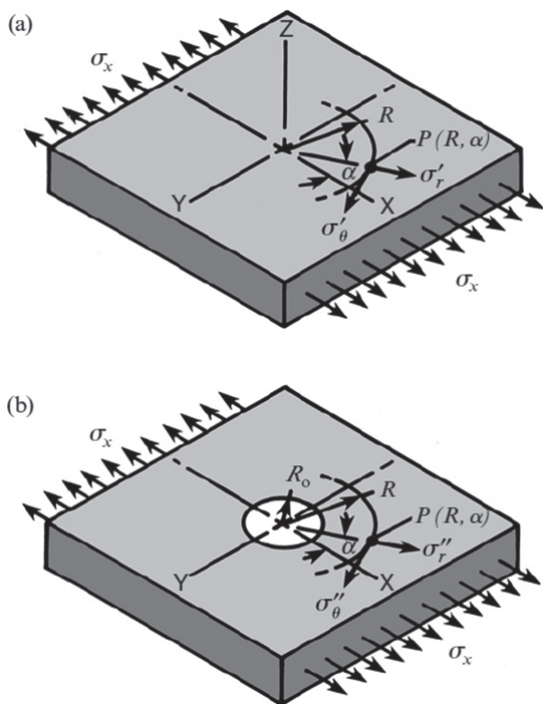


図2 穿孔前後の点 $P(R, \alpha)$ の応力状態<sup>(4)</sup>

図2の下図(b)は、小さな貫通穴が明けられた後のその板の同じ領域を示す。穴表面のどの場所でも $\sigma_r$  (垂直応力)と $\tau_{r,\theta}$  (せん断応力)はゼロでなければならないから、穴近くの応力分布は穴あけ前の状態とは全く相違するものとなり、このケースの解は、1898年にG. Kirschによって得られている<sup>(3)(4)</sup>。

穿孔後の応力から初期応力を差し引いたものは、応力変化、すなわち穿孔による点 $P(R, \alpha)$ の応力解放を与える。さらに、フックの法則を適用すると半径方向解放ひずみが与えられ、ロゼットひずみゲージにより3方向で測定された半径方向解放ひずみ： $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  (図1参照)から最終的に以下の式で主応力およびその方向を計算することができる。

$$\sigma_{\max} = -\frac{E}{2} \left\{ \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{\bar{a}(1+\nu)} - \frac{1}{\bar{b}} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \right\} \quad (1-a)$$

$$\sigma_{\min} = -\frac{E}{2} \left\{ \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{\bar{a}(1+\nu)} + \frac{1}{\bar{b}} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \right\} \quad (1-b)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \quad (1-c)$$

ここで、 $E$ はヤング率、 $\nu$ はポアソン比である。 $\bar{a}$ と $\bar{b}$ は校正定数であり、ASTM E837-08規格の中に表形式で規定されている。

### 3. 試験内容

#### 3.1 試験体

試験体はASTM E837-08で規定される“薄肉”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、Type Aゲージの場合は $t \leq 0.4D$ 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、 $t = 2.0\text{mm}$ とした。試験体の材質はSM490で、幅：25mm、長さ：390mmとした。また、試験体の機械加工等により生じる初期残留応力をできるだけ小さくするため、応力除去熱処理(SR)を施した。

#### 3.2 試験方法 (図3参照)

##### 3.2.1 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3に示す試験体のB点を穿孔法で測定し、 $X_0$ 点(試験体裏側)を電解研磨後にX線残留応力測定装置(Stresstech社製)で測定した。

##### 3.2.2 穿孔による解放ひずみ測定

本試験の主目的は既知の荷重応力によるA点の残留応力測定であり、理想的には引張試験機による荷重試験中に穿孔して解放ひずみを測定するこ

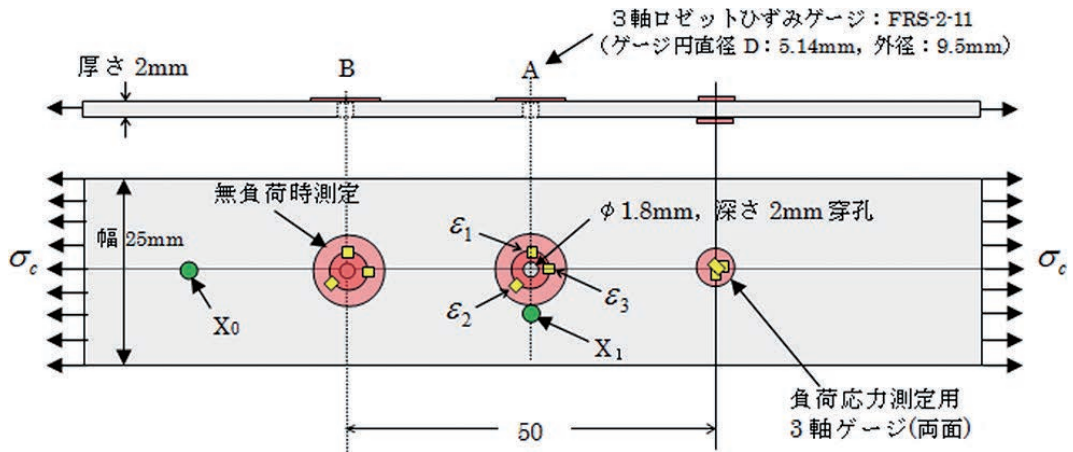


図3 薄肉平板試験体の1軸引張試験 (390L × 25b × 2t)

とが望ましい。しかし、試験体が薄肉であり、負荷試験中に横から穿孔するとドリルの推力により試験体が曲げ変形し、穿孔作業に支障を来す恐れがある。そのため、次のような方法を行った。

- ①A点を穿孔しない状態で、所定の応力を負荷し、このときのひずみ： $\varepsilon'$ を測定する。
- ②試験体を引張試験機から取り外し、A点を穿孔装置で貫通穿孔する。
- ③A点が穿孔された状態で、所定の応力を負荷し、このときのひずみ： $\varepsilon''$ を測定する。
- ④解放ひずみ： $\varepsilon = \varepsilon'' - \varepsilon'$ を計算する。

なお、①と③では、 $X_1$ 点（試験体裏側）をX線法で測定する。また、平板の表裏の対象位置に設置した3軸ゲージにより試験中の負荷応力と曲げ応力をモニタリングする。

#### 4. 試験結果

試験体は3体用意し、負荷応力 $\sigma_c$ は3ケース（Case1：100MPa、Case2：150MPa、Case3：200MPa）について試験した。

##### 4.1 材料の機械的性質

Case1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

のヤング率 $E$ とポアソン比 $\nu$ 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る。

##### 4.2 初期残留応力測定結果

使用した穿孔装置は深さ方向に不均一な応力分布測定にも対応できるように0.05mmステップで精密に穿孔できるものであり、Incremental Center Hole Drilling (ICHD) 装置と呼ばれ、穿孔ドリルは約400,000rpmの高速エアタービンで駆動される。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1 $\mu\text{m}$ の深さ分解能で自動的に穿孔する。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Spider8）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4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5に示す。

表1に負荷試験前の穿孔法とX線法によるB点および $X_0$ 点の初期残留応力測定結果を示す。なお、X線法の（ ）内の値は信頼性限界である。

穿孔法とX線法の測定場所は同一場所ではなく、また、前者は主応力に対して後者は引張荷重方向

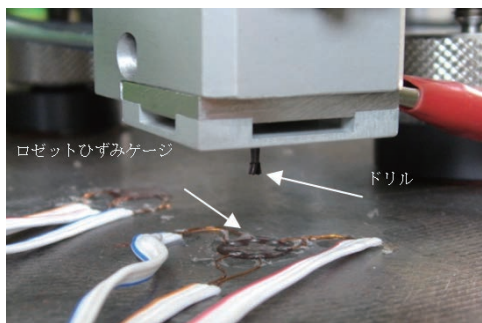


図4 穿孔部の詳細



図5 穿孔システム

表1 初期残留応力測定結果

Case No.	穿孔法 (位置 B)	X線法 (位置 X <sub>0</sub> )
1	$\sigma_{\max} = 8.0MPa, \sigma_{\min} = 3.3MPa$	$\sigma_x = -17.8MPa (\pm 20.8MPa)$
2	$\sigma_{\max} = 5.2MPa, \sigma_{\min} = 2.5MPa$	$\sigma_x = -13.9MPa (\pm 15.5MPa)$
3	$\sigma_{\max} = 12.2MPa, \sigma_{\min} = 6.1MPa$	$\sigma_x = -13.9MPa (\pm 20.2MPa)$

(長手方向) の応力で表示しているのが単純な比較はできないが、前者はすべて引張応力であるのに対して後者はすべて圧縮応力となっている。

### 4.3 解放ひずみ測定結果

図6に引張試験機(ねじ式AG-IS 堅型: 最大荷重能力 100kN)による薄肉平板試験体の負荷試験の様子を示す。薄肉試験体が上下のチャックで垂直方向に保持されており、ひずみゲージからのリード線はデータロガーに接続されている。データロガーには、引張試験機のデータ(荷重と変位)も入力されている。同図はひずみ測定前に、X線法により試験体裏面のX<sub>1</sub>位置の残留応力を測定する様子を示している。右側から試験体の裏面にアクセスし、コリメータ(X線を照射する部分)を試験体の長手方向にスキャンして側傾法により測定している。この試験では、貫通穿孔のみを上述の穿孔装置で行い、負荷試験中の解放ひずみはデータロガーにより測定した。

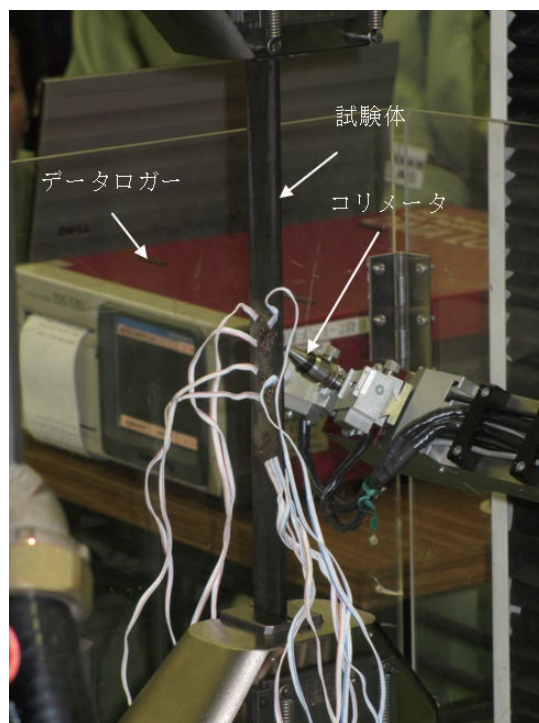


図6 引張試験の様子 (Case1)



図7に Case1 (100MPa) 用の試験体に接着したひずみゲージの写真を示す。大きい方の二つはロゼットひずみゲージ (外径 9.5mm) で、右端は初期残留応力測定用であり、中央は負荷応力測定用である。左側の小さなゲージは3軸ひずみゲージである。ロゼットひずみゲージの中央部に丸いマークが見えるが、この部分を穿孔する。表2にA点の解放ひずみ測定結果を示す。単位は  $\mu\epsilon$  である。

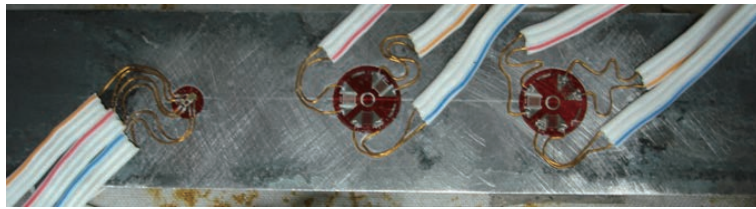


図7 試験体上のひずみゲージ (Case1)

#### 4.4 残留応力の計算結果

前項で得られた解放ひずみから、式 (1) を用いて A 点の残留応力を計算した。この場合、穿孔した孔径:  $D_0$  が校正定数:  $\bar{a}$  と  $\bar{b}$  に直接的に関係するので、穿孔装置 (ICHD) に備え付けられている顕微鏡により精密に孔径を測定した。次に、 $D_0/D$  を計算し、ASTM E837-08 で規定している均一応力場の Through Hole (貫通穴) に対する校正定数の表から、補間計算により  $\bar{a}$  と  $\bar{b}$  を求めた。

表3に計算結果を示す。

表2 A点の解放ひずみ測定結果

	測定ひずみ方向	穿孔前: $\epsilon'$	穿孔後: $\epsilon''$	解放ひずみ: $\epsilon = \epsilon'' - \epsilon'$
Case 1 (100MPa)	1	-131	-76	55
	2	194	117	-77
	3	434	294	-140
Case 2 (150MPa)	1	-184	-91	93
	2	319	226	-93
	3	665	444	-221
Case 3 (200MPa)	1	-239	-116	123
	2	442	298	-144
	3	883	586	-297

表3 A点の残留応力測定結果

	D (mm)	$D_0$ (mm)	$D_0/D$	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$\epsilon_1$ ( $\mu\epsilon$ )	$\epsilon_2$ ( $\mu\epsilon$ )	$\epsilon_3$ ( $\mu\epsilon$ )	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$\beta$ ( $^\circ$ )
Case 1 (100MPa)	5.14	1.90	0.3696	0.1369	0.4135	55	-77	-140	<b>103</b>	-2	-10
Case 2 (150MPa)	5.14	1.875	0.3648	0.1332	0.4045	93	-93	-221	<b>161</b>	-5	-5
Case 3 (200MPa)	5.14	1.89	0.3677	0.1355	0.4099	123	-144	-297	<b>216</b>	-8	-8

#### 4.5 考察

表 3 から、Case1 ~ Case3 の残留応力： $\sigma_{\max}$  は負荷応力に 3 ~ 8% の誤差で一致していることがわかる。1 軸引張試験の場合、 $\sigma_{\min}$  は理論的にはゼロになる。各ケースともゼロとはなっていないが、それらの値は小さい。4.2 項で述べたように穿孔法による測定では B 点に引張の初期残留応力が存在していた。A 点においても B 点と同程度の引張残留応力が初期状態で存在していたとすると、その初期残留応力に負荷応力を加算したものと  $\sigma_{\max}$  を比較する必要がある。この点を考慮すると、実際には表 3 の  $\sigma_{\max}$  はより小さくなり、それに対応して誤差は小さくなると考えられる。

$\beta$  は最も近い主軸からゲージ No1 ( $\epsilon_1$  方向) への角度 (正の場合はゲージ番号付方向、負の場合はその反対方向) である。本試験ではロゼットひずみゲージは  $\epsilon_1$  を薄肉平板の幅方向に、 $\epsilon_3$  を長手方向になるように接着しているため、 $\beta$  は  $\sigma_{\min}$  の方向となる。

穿孔法の測定誤差には種々の因子が影響するが、ASTM E837-08 規格によると、多くの研究機関が参加したラウンドロビン試験により、均一応力場では誤差は 10% を超えない結果が得られている。本試験の結果は、これを裏付けるものとなっている。

表 4 に穿孔前の負荷試験時に X 線法で測定した結果と 4.4 項の穿孔法による測定結果の比較を示す。これによると穿孔法の誤差は前述のように 3 ~ 8% であるのに対し、X 線法の誤差は -2 ~ 12% である。さらに、表 1 の初期残留応力も考慮

すると、本試験の範囲では穿孔法の方が X 線法よりも高い精度で測定できた。

#### 5. 結言

SM490 製薄肉平板試験体に 1 軸引張荷重を負荷して既知の均一応力場を与え、貫通穿孔前後のひずみ変化から穿孔による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の位置の残留応力を求めた。また、比較のため、X 線法による残留応力測定も併せて行った。これらの結果を要約すると以下ようになる。

- ①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できた。
- ②穿孔法と X 線法を比較すると、前者の方がやや高い測定精度で測定できた。

今後、厚肉試験体 (厚さ 10mm) について、今回と同様な 1 軸引張試験により均一応力場の場合の検証試験を実施した後、片持ち梁の曲げ試験により不均一応力場の検証試験を実施する予定である。

表 4 X 線法と穿孔法との比較

	X 線法 (位置 X <sub>1</sub> )	穿孔法 (位置 A)
Case 1 (100MPa)	$\sigma_x = 98MPa (\pm 12.7MPa)$	103 MPa
Case 2 (150MPa)	$\sigma_x = 130MPa (\pm 13.4MPa)$	161 MPa
Case 3 (200MPa)	$\sigma_x = 225MPa (\pm 11.6MPa)$	216 MPa

## 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) Mathar, J., “Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes”, Trans., ASME 56, No. 4: pp. 249-254, 1934
- (3) S. Timoshenko and J. M. Goodier, “Theory of Elasticity”, New York: McGraw-Hill, 1951
- (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法について (その1)” IIC REVIEW No. 48, 2012/10
- (6) 三上 隆男 “穿孔法による残留応力測定法について (その2)” IIC REVIEW No. 49, 2013/4



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  
材料試験部

高久 泰弘

TEL. 045-791-3519

FAX. 045-791-3542