

穿孔法による残留応力測定技術の検証試験 (深さ方向に不均一な応力分布の場合)

三上 隆男^{*1} 松田 昌悟^{*2} 夏井 一樹^{*3}
Mikami Takao *Matsuda Masanori* *Natsui Kazuki*

ASTM E837 規格（穿孔ひずみゲージ法による残留応力測定法）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）

①と②の規定についての検証試験結果については、それぞれ IIC REVIEW No.50 と No.53 で報告した。今回は、最も重要な規定③についての検証試験を実施した。その結果、穿孔法により、深さ方向に不均一な残留応力分布を測定できることを実証することができた。

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、ASTM E837、不均一応力

1. はじめに

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。

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

残留応力測定については、ASTM E837 規格で穿孔法（Center-hole Drilling）が規定されている⁽¹⁾⁽²⁾。最新の規格は ASTM E837-13 である。

この方法は、小型ドリルを使って表面から深さ1.0mmまで、φ1.8mm程度の穴を穿孔する際に、

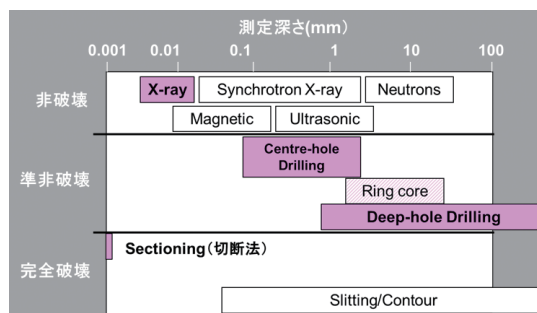


図1 残留応力の測定方法

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⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

*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

*2：計測事業部 計測技術部 部長

*3：計測事業部 計測技術部

ASTM E837-13 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について報告した。その結果、測定残留応力と既知の負荷応力とは概ねよく一致した⁽⁶⁾。

また、IIC REVIEW No.53 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条件下でブラインド穿孔試験を行った結果について報告した。その結果、測定残留応力と既知の負荷応力とは概ねよく一致した⁽⁷⁾。①、②を対象としたこれらの試験により、均一応力場における当社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⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

しかしながら、実際の溶接構造物や工業製品はほとんどの場合、深さ方向に不均一な残留応力分布を有している。そのため、多くのお客様が③の規定の検証を要望されているが、ASTM E837 規格に準拠した不均一残留応力分布測定法の妥当性の検証に関する発表論文は見当たらない。そこで、本稿では③の場合について検証試験を実施し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 E837-13 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を穿孔ステップごと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 E837-13 規格対応の専用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。

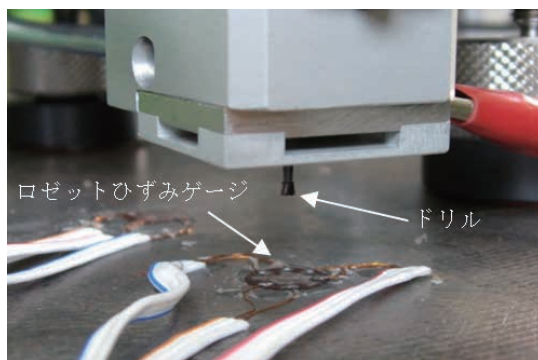


図 2 穿孔部の拡大写真



図 3 穿孔システム全体

3. 不均一残留応力分布測定試験の内容

図4に示すように、SM490（溶接構造用圧延鋼材）製の厚肉平板を試験体とし、片持ち梁試験装置を使って自由端側に重りを負荷し、試験体の上面側に引張曲げ応力を発生させる。固定端側に接着した4箇所のロゼットひずみゲージ位置で、穿孔試験を行い、深さ方向に不均一な曲げ応力を測定する。

平板の板厚方向には図5に示すように、中立軸に向かって直線的な曲げ応力分布が生じる。この応力分布は、材料力学の梁理論から容易に解析できる。この解析結果と穿孔法による測定結果を比較することにより、穿孔法による不均一応力測

定技術の妥当性を評価する。測定手順は下記のとおりである。

- (1) 図6に示すように、厚肉平板試験体の固定端側表面の板幅中央部4箇所（位置A～D、40mmピッチ）と $l=550\text{mm}$ の位置（図4 I点）および A_b 点（A点の裏側）にロゼットひずみゲージ（TML製FRS-2-11、ゲージ円直径 $\phi D=5.14\text{mm}$ ）を接着する。
また、負荷応力確認用として、各ロゼットひずみゲージから板幅方向に15mmの位置（両側2箇所）に1軸ひずみゲージを梁の長手方向が受感方向となるように接着する。
- (2) 試験体を試験装置に組付ける前に、無負荷状態でI点（ $l=550\text{mm}$ の位置）および A_b 点

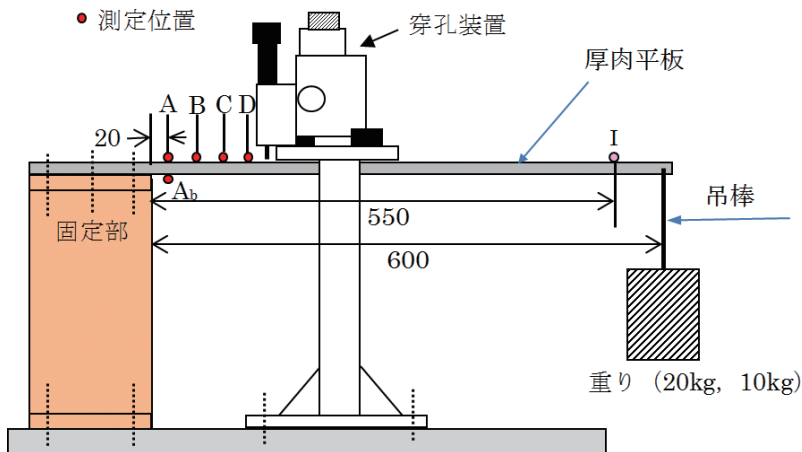


図4 厚肉平板（600L × 50b × 10t）の片持ち梁試験のイメージ図

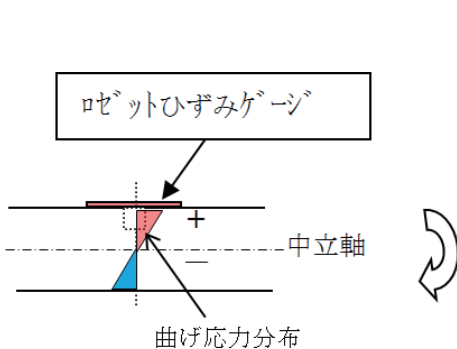


図5 曲げ応力分布

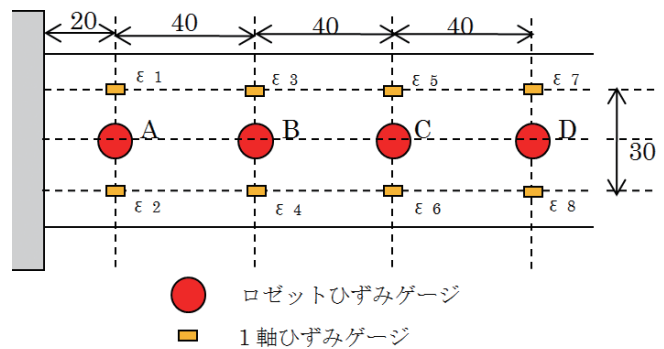


図6 ひずみゲージ配置図（固定部付近）

でドリル径 $\phi D_0=1.6\text{mm}$ で深さ 1.0mm (0.05mm ピッチ $\times 20$ ステップ) までブラインド穿孔し、測定された解放ひずみと、ASTM E837-13 で規定されている不均一応力場の校正係数を使って初期残留応力を計算する。

- (3) 厚肉平板試験体を片持ち梁治具に設置し、自由端に 20kg の重りを負荷し、A 点～D 点での曲げ応力が梁理論による解析値と同等であることを 1 軸ひずみゲージにより確認する。
- (4) A 点においてドリル径 $\phi D_0=1.6\text{mm}$ で深さ 1.0mm (0.05mm ピッチ $\times 20$ ステップ) までブラインド穿孔し、測定された解放ひずみと、ASTM E837-13 で規定されている不均一応力場の校正係数を使って初期残留応力を計算する。
- (5) 穿孔装置を移動させて、B 点と C 点で (4) と同様な測定を行う。
- (6) 上記の (4) と (5) で測定されたひずみと、ASTM E837-13 で規定されている不均一応力場の校正係数を使って曲げ応力分布を計算し、これと梁理論により解析した σ_y 分布とを比較する。
- (7) 自由端の重りを 10kg に減少し、D 点で (4) と同様な測定および解析を実施する。

4. 試験結果

4.1 初期残留応力の測定結果

厚肉平板試験体は機械加工などによ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 (600°C 真空で 1 時間) を施した。

初期残留応力は試験体の場所により異なると考えられるが、代表点として図 4 に示す I 点と A_0 点の初期残留応力を曲げ試験を実施する前に測定した。

A_0 点の穿孔前後のロゼットひずみゲージの様子をそれぞれ図 7、図 8 に示す。

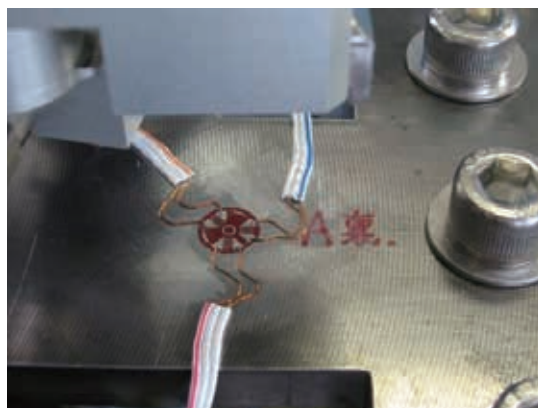


図 7 穿孔前 (A_0 点)



図 8 穿孔後 (A_0 点)

SM490 のヤング率： E とポアソン比： ν は、それぞれ、 $E=211\text{GPa}$, $\nu=0.3$ とした⁽⁶⁾。

4.1.1 I 点の解放ひずみ測定結果と残留応力解析結果

図 9 に累積解放ひずみの測定結果を示す。なお、穿孔径の実測値は $\phi 1.75\text{mm}$ であった。解放ひずみは非常に小さく、デジタル静ひずみ計の測定分解能 ($\pm 1\mu\epsilon$) が影響するほどのレベルである。

図 10 に残留応力の解析結果を示す。なお、 σ_x は試験体の長手方向、 σ_y は幅方向の応力である。表層部は機械加工およびゲージ貼りのための研磨作業により付与された圧縮残留応力が残っているが、深さ 0.1mm 以降は SR 処理の効果により σ_x

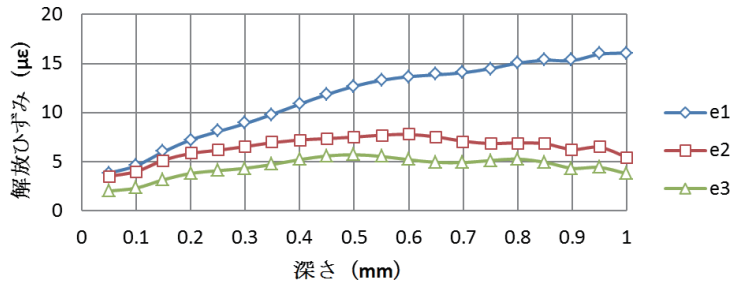


図9 累積解放ひずみ (I点)

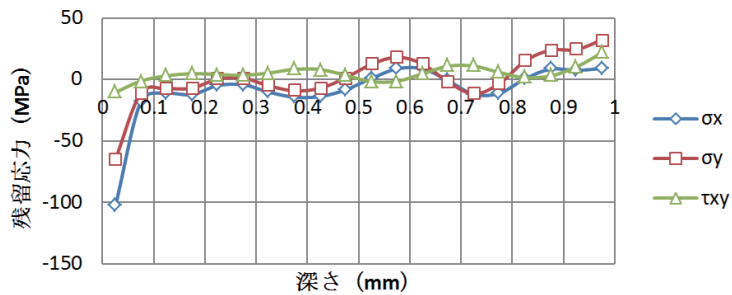


図10 初期残留応力 (I点)

は平均的にはほぼゼロとなっている。深さ方向に
 応力が振動しているように見えるが、これは解放
 ひずみが小さく、その測定誤差が影響しているた
 めである。

4.1.2 A_b 点の解放ひずみ測定結果と残留応力解 析結果

図11に累積解放ひずみの測定結果を示す。なお、
 穿孔径の実測値はφ1.77mmであった。解放ひず
 みはI点と同様に小さいが、分布は全く異なる。

図12に残留応力の解析結果を示す。σ_xに着目
 すると、深さ0.1mm以下の表層部はI点と同様
 に機械加工などにより付与された圧縮残留応力が
 残っている。深さ0.1mm～0.4mmの間は引張応
 力でほぼ一定値を保っているが、それ以降の深さ
 では引張応力の範囲で波うちながら値が大きくな
 る。I点とは異なる残留応力分布である。これは、
 A_b点は大きな熱容量を有する固定端側に近く、
 SR後の冷却過程における温度変化がI点とは相
 違するためと考えられる。

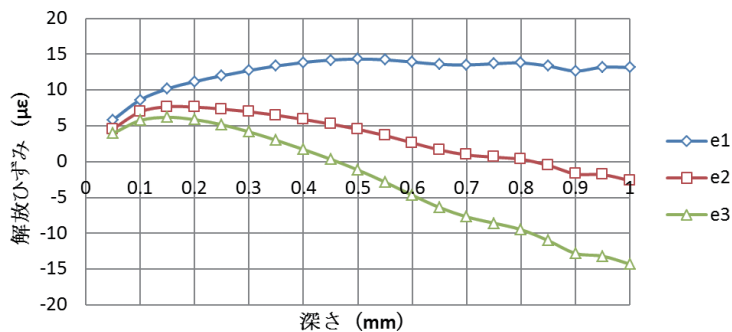


図11 累積解放ひずみ (A_b点)

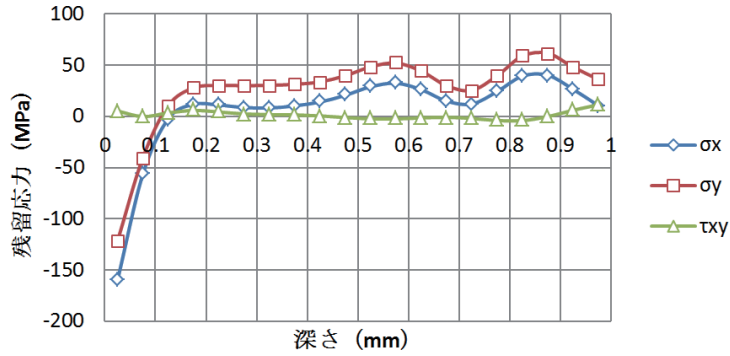


図 12 初期残留応力 (A₀ 点)

4.2 曲げ試験の結果

4.2.1 曲げ応力解析

図 4 の片持ち梁による曲げ試験で A ～ D 点に作用する曲げ応力は、梁理論 (beam theory) により以下のように計算できる。

固定端から測定点までの距離を ℓ (m)、重りの質量を m (kg)、試験体の幅を b (m)、厚さを h (m) とすると、測定点の表面に作用する最大曲げ応力: σ_{\max} は、

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{Z} = \frac{m \cdot g \cdot (0.6 - \ell)}{\frac{1}{6}bh^2} = \frac{6 \cdot m \cdot g \cdot (0.6 - \ell)}{bh^2} \quad (1)$$

ただし、

M : 曲げモーメント (N·m)

Z : 断面係数 (m³)

g : 重力の加速度 (9.8m/s²)

重りを載せる皿や吊下げ棒の質量は測定の結果、約 0.6kg であり、これを考慮した。

①A 点 ($\ell = 0.02\text{m}$) の曲げ応力: σ_A

$$\sigma_A = \frac{6 \times 20.6 \times 9.8 \times 0.580}{0.05 \times 0.01^2} = 140.5 \text{MPa}$$

②B 点 ($\ell = 0.06\text{m}$) の曲げ応力: σ_B

$$\sigma_B = \frac{6 \times 20.6 \times 9.8 \times 0.540}{0.05 \times 0.01^2} = 130.8 \text{MPa}$$

③C 点 ($\ell = 0.10\text{m}$) の曲げ応力: σ_C

$$\sigma_C = \frac{6 \times 20.6 \times 9.8 \times 0.500}{0.05 \times 0.01^2} = 121.1 \text{MPa}$$

④D 点 ($\ell = 0.14\text{m}$) の曲げ応力: σ_D

$$\sigma_D = \frac{6 \times 10.6 \times 9.8 \times 0.460}{0.05 \times 0.01^2} = 57.3 \text{MPa}$$

4.2.2 負荷応力測定結果

片持ち梁試験装置に穿孔装置をセットした状態の外観写真を図 13、図 14 に示す。なお、図 13 は 10kg の重りを取り付けた状態の写真である。

また、穿孔中の様子、穿孔装置制御 PC の画面および負荷応力測定用静ひずみ計の写真を図 15 ～図 17 に示す。

曲げ応力モニタリング用の 1 軸ひずみゲージ ($\varepsilon_1 \sim \varepsilon_8$) の測定値から計算した曲げ応力値と、前項の梁理論による解析値との比較を表 1 に示す。この場合、ロゼットひずみゲージは 1 軸ひずみゲ-

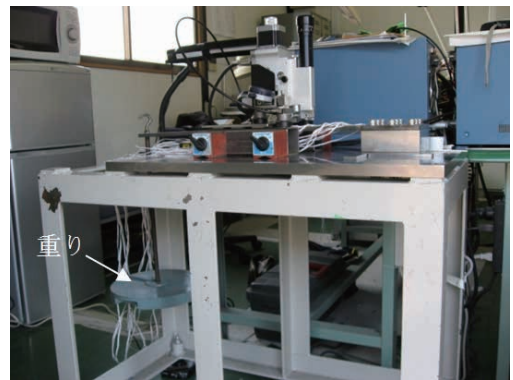


図 13 試験装置の外観 (1)

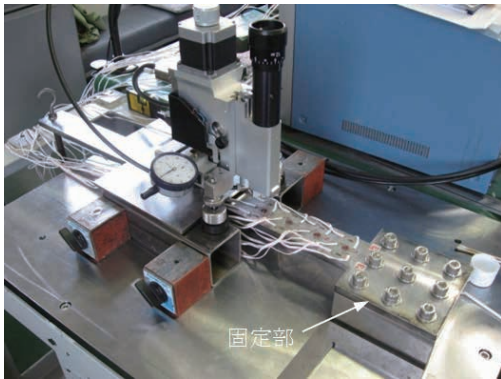


図 14 試験装置の外観 (2)



図 17 負荷応力測定用静ひずみ計

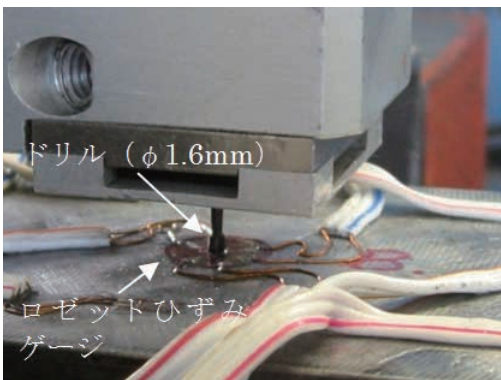


図 15 穿孔中の様子

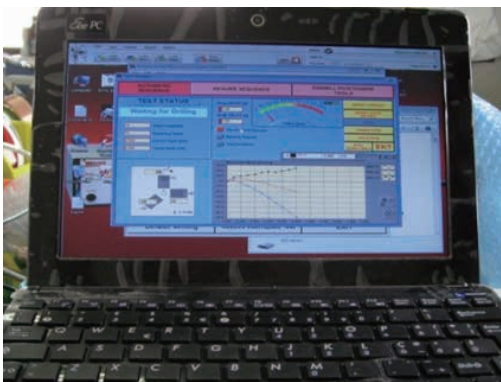


図 16 穿孔中の制御 PC 画面

ジの中間に位置しているため、各点の負荷応力は両側の 1 軸ひずみゲージの出力の平均値(例えば、A 点の場合は ϵ_1 と ϵ_2 の平均値)を使用した。両者は $\pm 1\%$ 以内の誤差で一致しており、A 点～D 点のロゼットひずみゲージの位置に計画どおりの曲げ応力が負荷されていることがわかる。

4.2.3 累積解放ひずみの測定結果

図 18～図 21 に A 点～D 点の累積解放ひずみの測定結果を示す。なお、穿孔径の実測値は全て $\phi 1.77\text{mm}$ であった。

4.2.4 残留応力の解析結果

前項の累積解放ひずみを基に、ASTM E837 規格の計算式⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵⁾により解析した A 点～D 点の曲げ応力受感方向の応力： σ_x を 図 22～図 25 に示す。これらの図には比較のため、4.2.1 項の梁理論による解析結果も表示している。

表 1 最大曲げ応力の解析値と測定値の比較

| 測定点 | 負荷質量 (kg) | 最大曲げ応力： σ_{\max} (MPa) | | |
|-----|-----------|-------------------------------|------------|----------|
| | | 梁理論 (B) | ひずみゲージ (S) | 誤差 (B/S) |
| A | 20.6 | 140.5 | 139.7 | +0.6 % |
| B | 20.6 | 130.8 | 130.8 | 0.0 % |
| C | 20.6 | 121.1 | 121.3 | -0.2 % |
| D | 10.6 | 57.3 | 57.4 | -0.2 % |

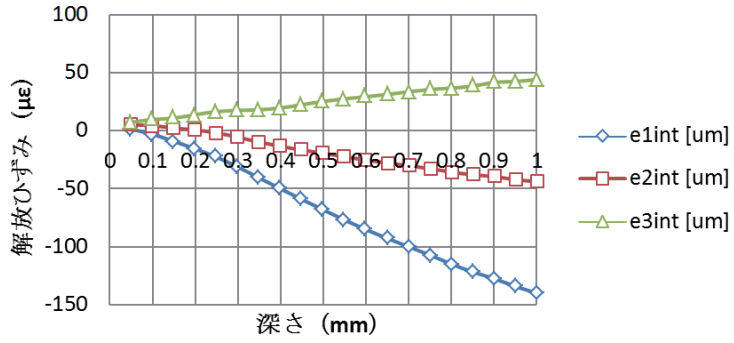


図 18 累積解放ひずみ (測定点 A)

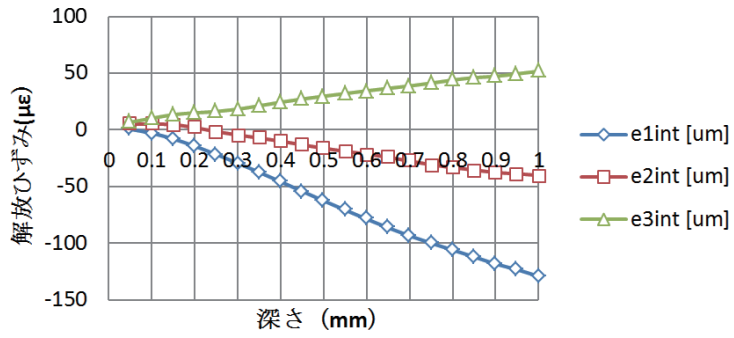


図 19 累積解放ひずみ (測定点 B)

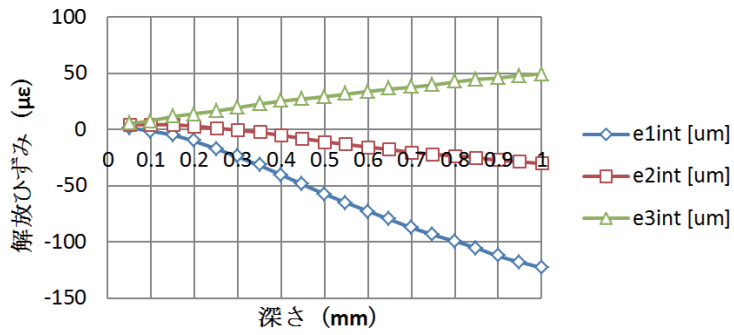


図 20 累積解放ひずみ (測定点 C)

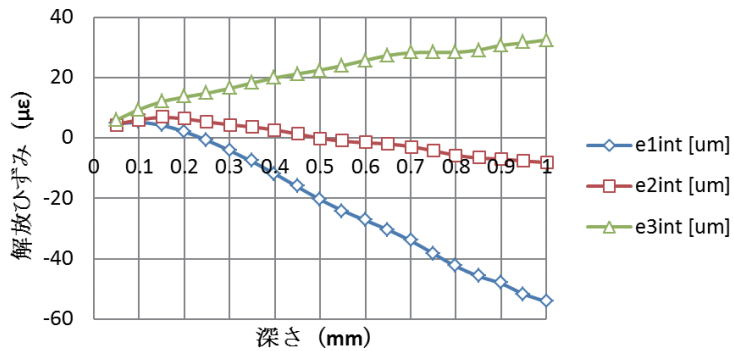


図 21 累積解放ひずみ (測定点 D)

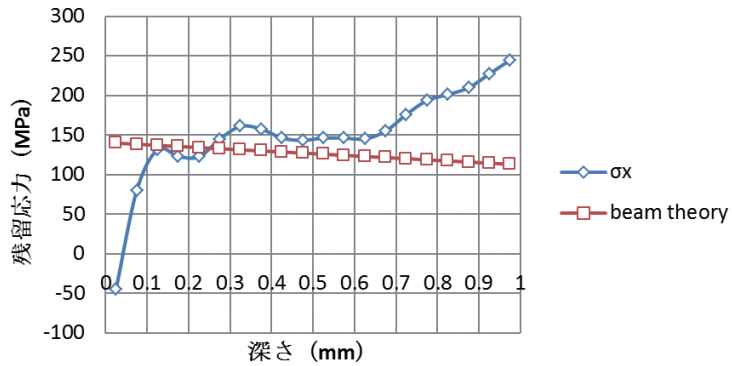


図 22 残留応力分布の測定結果と梁理論との比較 (測定点 A)

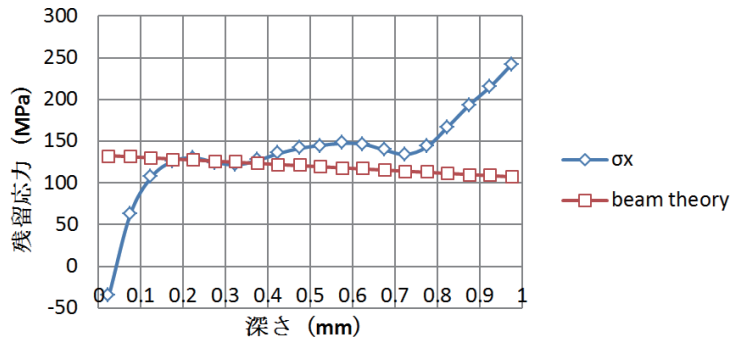


図 23 残留応力分布の測定結果と梁理論との比較 (測定点 B)

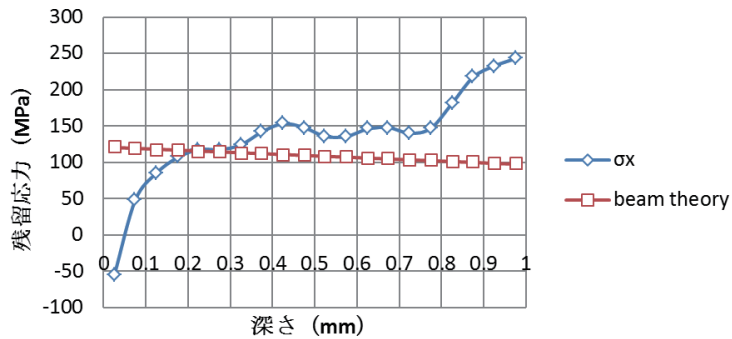


図 24 残留応力分布の測定結果と梁理論との比較 (測定点 C)

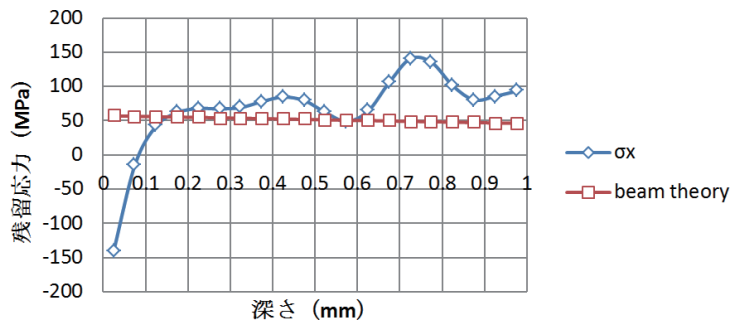


図 25 残留応力分布の測定結果と梁理論との比較 (測定点 D)

5. 考察

4.1 項で述べたように、表面近傍では機械加工などにより大きな圧縮応力が付与されている。この圧縮応力は、SR 後も解放されないで存在している。A 点～D 点の初期残留応力は不明であるが、A 点の初期残留応力を試験体裏側の A_b 点での測定結果 (図 12 の σ_y) と仮定すると、深さ 0.025mm の位置で、約 -170MPa の圧縮応力が存在している。これに、重り負荷による曲げ応力 (表 1 に示すように A 点では約 140MPa) が加算されても圧縮応力が残る。これが、A 点 (図 22 参照) で深さ約 0.05mm までに観察される圧縮応力の原因になっている。深さ約 0.1mm ～ 0.3mm での測定応力は梁理論と良く一致しているが、それ以降の深さでは測定結果の方が大きくなっている。これも図 12 に示すような初期残留応力の影響である。B 点～D 点でも A 点と同様に、それぞれの位置での初期残留応力が曲げ応力に加算されている。

結論として、図 22 ～ 図 25 の beam theory からかい離れた部分に相当する初期残留応力が A 点～D 点の位置に存在していたものと考えられる。

A 点～C 点の初期残留応力パターンは類似しており、深さ 0.7mm 以降は増加傾向となり、深さ 1.0mm では約 150MPa の値を示している。D 点の深さ 0.7mm 以降の初期残留応力パターンは A 点～C 点とは相違し、応力値も小さい。固定部から離れているので SR 後の冷却過程における温度変化が A 点～C 点とは相違するためと考えられる。なお、I 点まで離れると、固定部の熱容量の影響は全くなり、深さ 0.7mm 以降の応力値はゼロとなる (図 10 参照)。

6. おわりに

試験体から初期残留応力を完全に取り除くことができれば、穿孔法による測定結果は深さ方向の全ての位置で beam theory による解析結果とほぼ一致するものと考えられる。しかし、現実には初期残留応力を完全に取り除くことは不可能である。

初期残留応力の影響により、深さ方向全体で beam theory と完全に一致することを確認することはできなかったが、本研究の本質的な目標である「穿孔法により深さ方向に不均一な実際の応力分布を測定できる」ことを実証することができた。

以上により、ASTM E837-13 で規定している以下の 3 種類の場合について、全ての検証を完了した。

- ① 薄肉板で深さ方向に均一な応力 (貫通穿孔測定)
- ② 厚肉板で深さ方向に均一な応力 (ブラインド穿孔測定)
- ③ 厚肉板で深さ方向に不均一な応力 (ブラインド穿孔測定)

これまでは、穿孔法は金属材料に適用してきたが、産業界からはプラスチック材料の残留応力測定の要望も多い。プラスチック材料は非結晶体のため、X 線法では残留応力を測定することができない。そのような背景もあり、穿孔法に大きな期待が寄せられている。今後、プラスチック材料用の穿孔装置を導入し、金属とプラスチックの両方を対象にして測定サービスを展開していく予定である。

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) Technical Note TN-503-6, "Measurement of Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gauge Method", Vishay Measurement Group, 2010
- (4) 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、pp.53-65
- (5) 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
- (6) 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
- (7) 三上隆男、松田昌悟、鈴木優平、高久泰弘：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）、IIC REVIEW、No.53、2015/04、pp.37-47
- (8) 三上隆男：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）、JSNDI SSE シンポジウム（第44回）、2013/01
- (9) 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



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

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

夏井 一樹

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