

ブラスト処理された鋼材の穿孔法による 深さ方向残留応力測定

三上 隆男^{*1} 鈴木 優平^{*2} 夏井 一樹^{*3}
Mikami Takao Suzuki Yuhei Natsui Kazuki

橋梁などの鉄鋼部材は、防食塗装の定着性を向上させるため、一般的に鋼材表面にブラスト処理を施している。このブラスト処理により鋼材の表層部には残留応力が付与されていると考えられる。筆者らは、ブラスト処理されたH型鋼を試験体としてASTM E837-13a規格の穿孔法を用いて深さ方向に不均一な残留応力分布を測定した。この際に、同規格で規定されている3種類の大きさのロゼットひずみゲージの内の2種類を用い、ゲージの大きさが残留応力の測定分解能に及ぼす影響も明らかにした。

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 E837-13a、不均一応力、ブラスト処理、測定分解能

1. はじめに

橋梁などを構成している鉄鋼部材は、防食塗装の定着性を向上させるため、一般的に鋼材表面にブラスト処理を施している。このブラスト処理により鋼材の表層部には残留応力が付与されていると考えられる。この残留応力に供用応力が重畳するので、残留応力の符号、大きさおよび分布に応じて構造強度的には有益にも不利益にもなる。引張残留応力は構造物の疲労寿命を低下させる原因となり、逆に、圧縮残留応力は疲労寿命を向上させるので、圧縮残留応力が存在することが望ましい。しかし、ブラスト処理された鋼材の表面から深さ方向の残留応力分布についての測定報告例はほとんどない。

数ある残留応力の測定方法の中で、準非破壊法に属する穿孔法はASTM E837-13a規格で規定されており、X線回折法と並んで世界中で広く使用されている。

そこで、筆者らは、ブラスト処理したH型鋼を試験体とし、穿孔法を用いて深さ方向に不均一な残留応力分布を測定した。規格では、測定に使用するロゼットひずみゲージのサイズ(3種類)に応じて、穿孔径、穿孔深さ(測定深さ)が規定されている。したがって、ロゼットひずみゲージのサイズにより、残留応力の測定分解能が変化することになる。今回のH型鋼の測定では、2種類のロゼットひずみゲージを適用し、ゲージの大きさが残留応力の測定分解能に及ぼす影響を明らかにした。

*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

*2：計測事業部 計測技術部 福浦グループ

*3：計測事業部 材料試験部

2. ASTM E837-13a 規格の概要⁽¹⁾

この規格は、日本語では「穿孔ひずみゲージ法による残留応力測定規格」と訳され、小形ドリルを使って表面から1mm～2mmの深さまで、 $\phi 1\text{mm} \sim 4\text{mm}$ 程度の穴を段階的に穿孔する際に、解放されるひずみを穴周囲に配置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手順を規定している。穿孔によって解放されたひずみから2次元線形弾性論に基づく数学的関係を用いて評価する。解放ひずみは穴内部の材料に元々存在していた残留応力に依存する。

本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）⁽²⁾⁽³⁾

構造部品は一般的に深さ方向に不均一な残留応力分布を有しているため、③の規定が最も重要である。

不均一応力分布の場合、穿孔ステップ完了後に測定される表面の解放ひずみは、全ての穿孔ステップにおいて元々材料内に存在していた残留応力に依存し、次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_j = & \frac{1+\nu}{E} \sum_{k=1}^j \bar{a}_{jk} \left((\sigma_x + \sigma_y) / 2 \right)_k \\ & + \frac{1}{E} \sum_{k=1}^j \bar{b}_{jk} \left((\sigma_x - \sigma_y) / 2 \right)_k \cos 2\theta \\ & + \frac{1}{E} \sum_{k=1}^j \bar{b}_{jk} (\tau_{xy})_k \sin 2\theta \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、

\bar{a}_{jk} = 等方応力に対する校正マトリクス

\bar{b}_{jk} = せん断応力に対する校正マトリクス

E = ヤング率

j = これまでの穿孔ステップ数（通し番号）

k = 穿孔ステップの順番

ε_j = j 穿孔ステップが実行された後に測定された解放ひずみ

ν = ポアソン比

θ = x 軸からのひずみゲージ角度

$(\sigma_x)_k$ = 穿孔ステップ k 内の x 方向垂直応力

$(\sigma_y)_k$ = 穿孔ステップ k 内の y 方向垂直応力

$(\tau_{xy})_k$ = 穿孔ステップ k 内の xy せん断応力

なお、校正マトリクス \bar{a}_{jk} の定義 (\bar{b}_{jk} も同様) については図1を参照し、その技術的な意味に

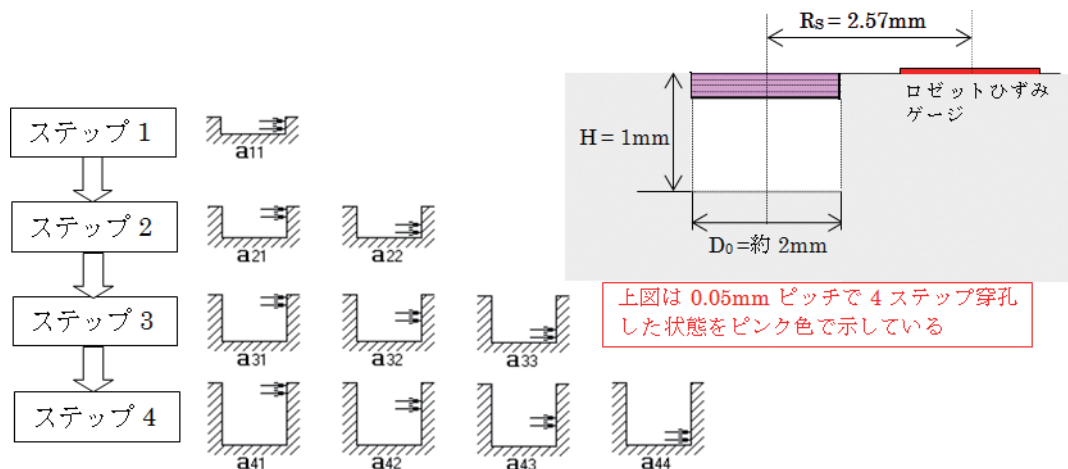


図1 校正マトリクス \bar{a}_{jk} の定義 (例：ステップ4まで穿孔された状態)

については参考文献 (2) を参照していただきたい。

図 2 に ASTM E837-13a 規格で規定されているロゼットひずみゲージのタイプと、測定座標系の定義を示す。これらの中で、Type A と呼ばれるロゼットひずみゲージには 3 種類の大きさ（ゲージ円：D が $\phi 2.57\text{mm}$ 、 $\phi 5.14\text{mm}$ および $\phi 10.28\text{mm}$ ）があり、これらに③の規定を適用する場合の穿孔径、測定深さおよび測定分解能の関係を表 1 に示す。最大測定深さを等間隔の 20 ステップで穿孔したときに、各深さでの残留応力計算に使用する校正定数が規格で規定されているため、表 1 のような分解能となる。 $\phi 2.57\text{mm}$ ゲージを用いた場合が最も測定分解能が高いが、最大測定深さは浅くなる。深さ方向の残留応力分布の変化の程度、測定したい最大深さおよび穿孔径を考慮して適切なゲージ径を採用する必要がある。

3. 試験体

試験体として $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ の H 型鋼を用いて、以下の条件でブラスト処理を施した。

- ・ブラスト方法：エアブラスト。吹付距離や送り速度は手作業で適宜調整。
- ・吹付エア圧力： 0.5MPa
- ・ブラスト研掃材：グリット
- ・仕上り表面粗さ： $R_z = 50 \sim 70\mu\text{m}$

4. 測定位置と測定状況

本研究では、測定分解能の影響を調べるため、上記の 3 種類のロゼットひずみゲージの内、頻繁に使用されている小形と中形のものを用いて測定した。測定位置を図 3 に示す。小形、中形ゲージとも試験体のウェブ中心線から 50mm 離れた位

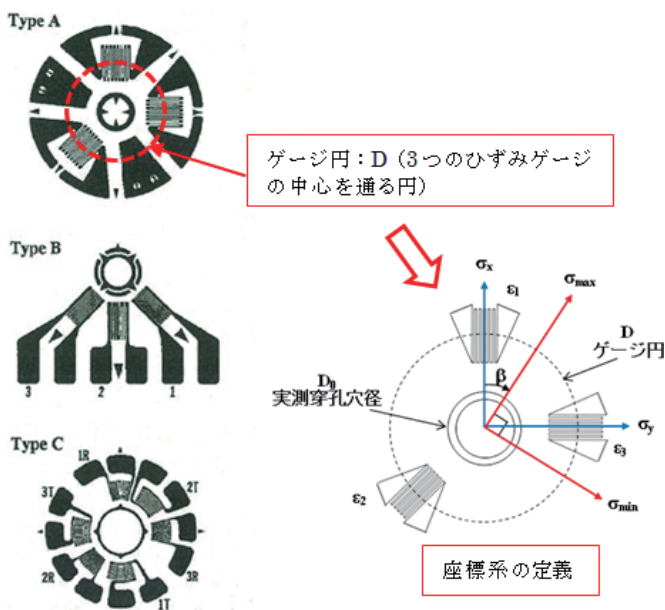


図 2 穿孔測定用ロゼットひずみゲージ⁽¹⁾

表 1 ゲージ円と穿孔径、測定深さおよび測定分解能との関係

ゲージ円 (D)	穿孔径 (D ₀)	測定深さ (h)	測定分解能 (Δh)
$\phi 2.57\text{mm}$	約 $\phi 1\text{mm}$	0.5mm	0.025mm
$\phi 5.14\text{mm}$	約 $\phi 2\text{mm}$	1.0mm	0.050mm
$\phi 10.28\text{mm}$	約 $\phi 4\text{mm}$	2.0mm	0.100mm

置で 15mm の間隔で各 2 箇所測定した。15mm 間隔とした理由は、測定位置を $6 \times D_0$ 以上離せば、お互いのひずみ解放の影響を受けないとされてい

る⁽⁴⁾ので、それよりさらに安全側の間隔とした。

図4～図7に小形ロゼットひずみゲージ($\phi 2.57\text{mm}$)による測定状況を示す。

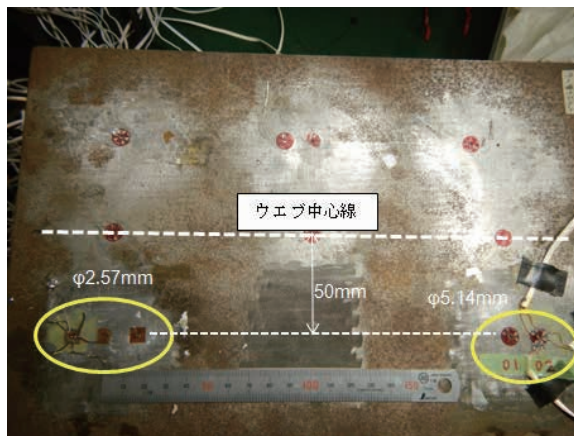


図3 測定場所 ($\phi 2.57\text{mm}$ と $\phi 5.14\text{mm}$ ゲージ穿孔後の状況)



図4 穿孔前 ($\phi 2.57\text{mm}$ ゲージ NO.1)



図6 穿孔中の様子 ($\phi 2.57\text{mm}$ ゲージ)



図5 試験体上の穿孔装置

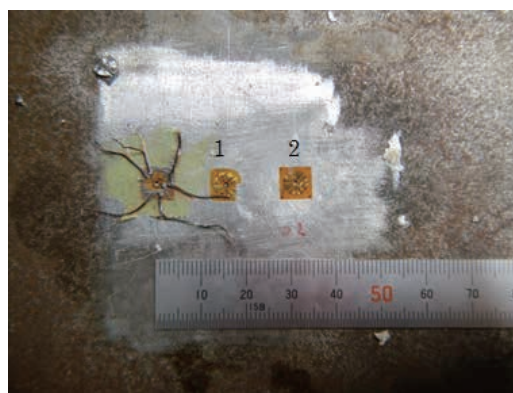


図7 穿孔後 ($\phi 2.57\text{mm}$ ゲージ NO.1、NO.2)

図8～図10に中形ロゼットひずみゲージ($\phi 5.14\text{mm}$)による測定状況を示す。

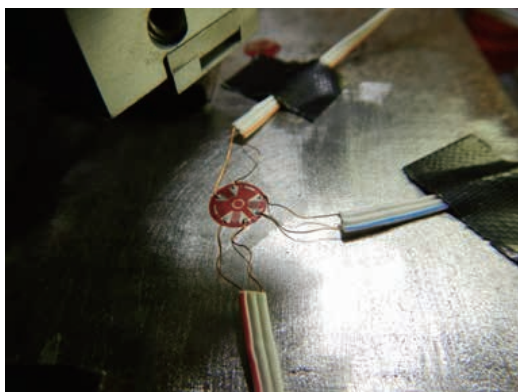


図8 穿孔前 ($\phi 5.14\text{mm}$ ゲージ)



図9 穿孔中の様子 ($\phi 5.14\text{mm}$ ゲージ)

5. 試験結果

$\phi 2.57\text{mm}$ ゲージによる累積解放ひずみの測定結果を図11と図12に、主応力分布の解析結果を図13と図14に示す。

$\phi 5.14\text{mm}$ ゲージによる累積解放ひずみの測定結果を図15と図16に、主応力分布の解析結果を図17と図18に示す。

6. 考察

(1) 小形ロゼットひずみゲージ ($\phi 2.57\text{mm}$) の場合

図11と図12の累積解放ひずみを比較すると、

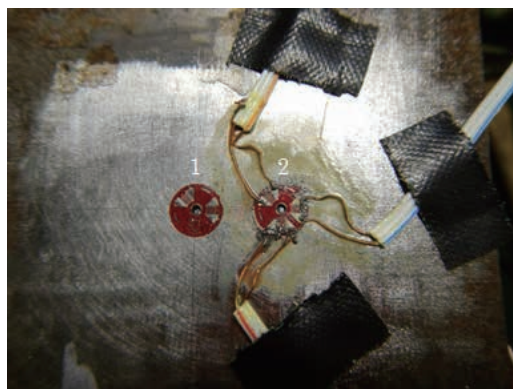


図10 穿孔後 ($\phi 5.14\text{mm}$ ゲージ NO.1、NO.2)

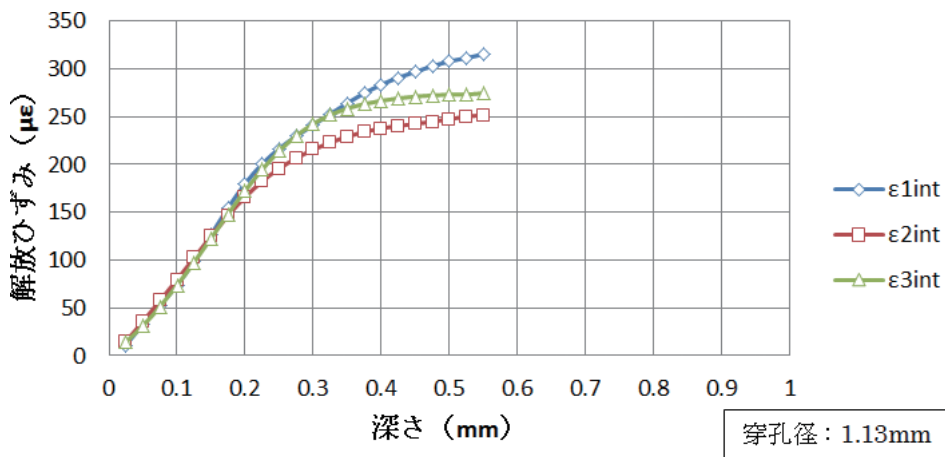


図11 累積解放ひずみ ($\phi 2.57\text{mm}$ ゲージ NO.1)

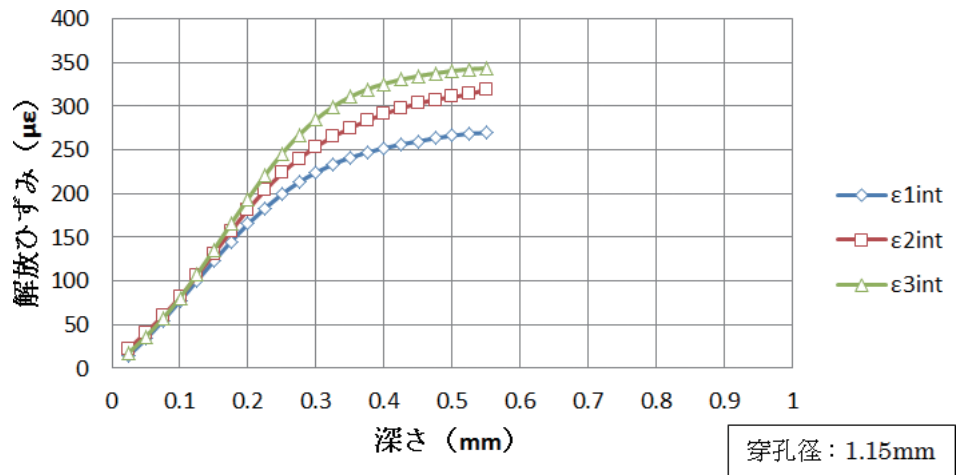


図 12 累積解放ひずみ (φ2.57mm ゲージ NO.2)

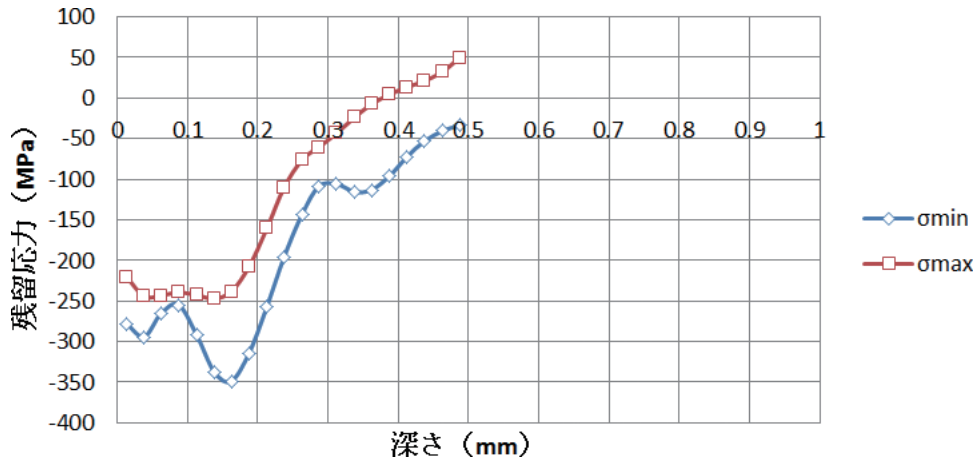


図 13 主応力分布 (φ2.57mm ゲージ NO.1)

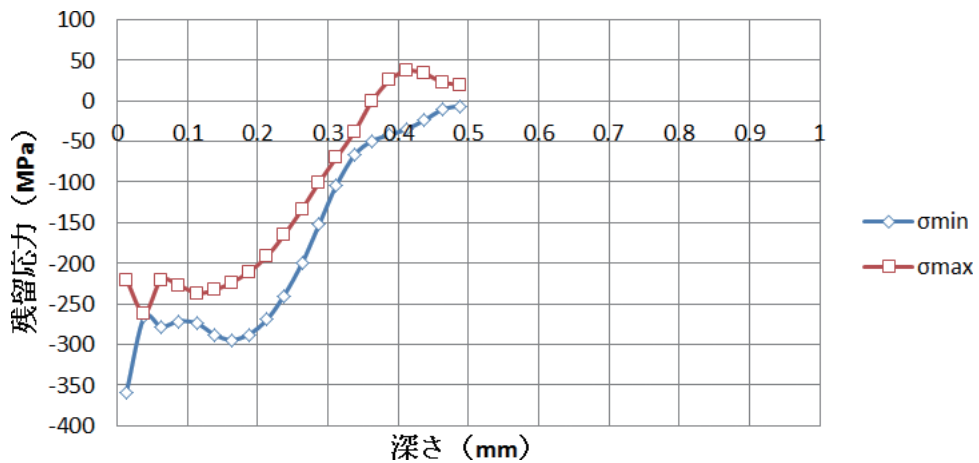


図 14 主応力分布 (φ2.57mm ゲージ NO.2)

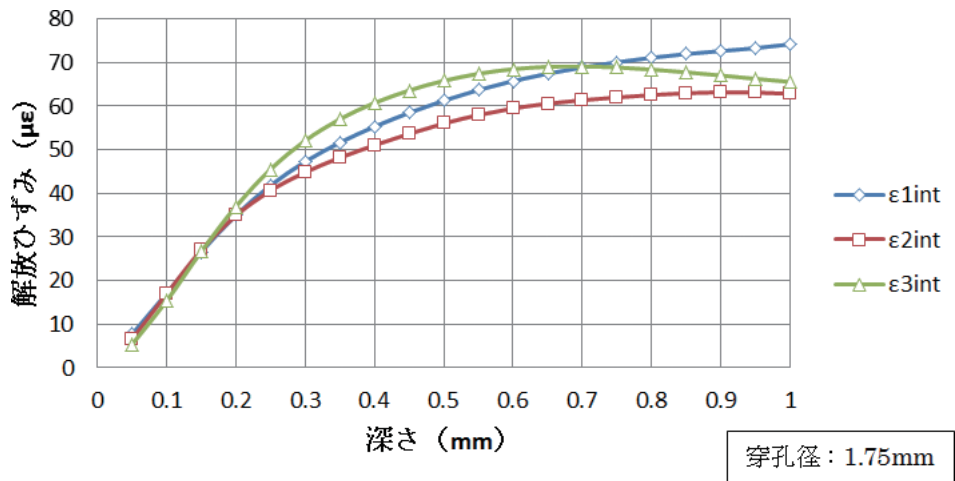


図 15 累積解放ひずみ (ϕ 5.14mm ゲージ NO.1)

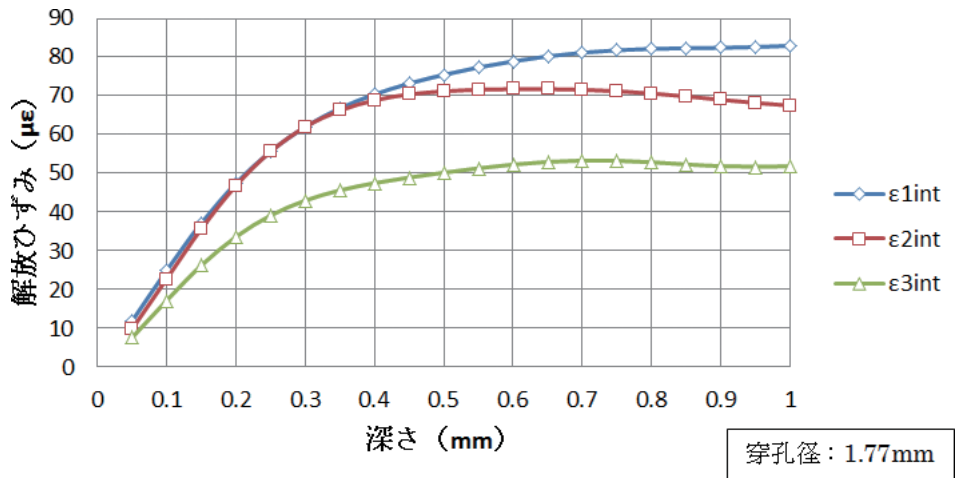


図 16 累積解放ひずみ (ϕ 5.14mm ゲージ NO.2)

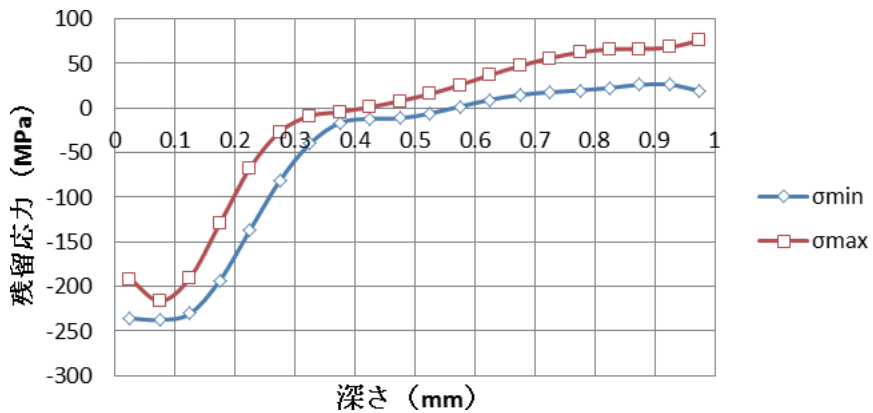


図 17 主応力分布 (ϕ 5.14mm ゲージ NO.1)

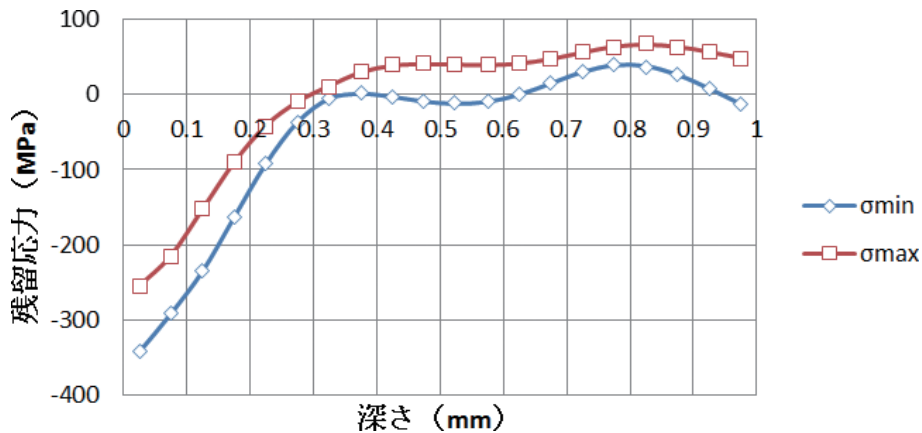


図 18 主応力分布 (φ5.14mm ゲージ NO.2)

両者のパターンが若干異なっている。これは、測定場所の違いによるものである。図 13 と図 14 の主応力分布の解析結果を比較すると、両者とも深さ約 0.1mm までは複雑な変化をしている。ロゼットひずみゲージを接着するために前処理として表面をサンドペーパーで研磨しているが、これによる残留応力が元々存在しているブラスト処理による残留応力に重畳しているためである。深さ 0.1mm 以降は、両者とも圧縮応力から引張応力に移行していく様子が捉えられている。深さ 0.15mm で圧縮応力のピークが存在しており、深さ 0.4mm 程度で残留応力はゼロになることがわかる。

(2) 中形ロゼットひずみゲージ (φ5.14mm) の場合

図 15 と図 16 の累積解放ひずみを比較すると、両者のパターンが若干異なっている。これは、測定場所の違いによるものである。図 17 と図 18 の主応力分布の解析結果を比較すると、両者とも深さ約 0.1mm までは前述のようにサンドペーパーによる研磨の影響を受けているが、φ2.57mm ゲージに比べると測定分解能が 1/2 になっているため、測定値が平均化され、なだらかな応力変化として捉えられている。深さ 0.1mm 以降は、両者とも圧縮応力から引張応力に移行していく様子

が捉えられているが、測定分解能の影響で、深さ 0.15mm 付近での圧縮応力のピークは捉えることができていない。しかし、深さ約 0.4mm で残留応力がゼロになることは捉えられている。

7. おわりに

H 型鋼にブラスト処理を施した試験体について、穿孔法により深さ方向に不均一な残留応力分を測定した。ASTM E837-13a 規格で Type A と呼ばれる 3 種類のサイズのロゼットひずみゲージの内、2 種類のゲージを用いて、測定分解能の影響も比較した。

ブラスト処理により、表層部に大きな圧縮の残留応力が付与され、疲労強度の面からは有益であることが明らかとなった。この圧縮残留応力の大きさや分布を精度良く測定したい場合は、小形ロゼットひずみゲージを適用することを推奨する。ブラスト処理されていない一般的な測定対象物については、中形または大形ロゼットひずみゲージを適用して深層部（最大 2mm）まで残留応力分布を測定することが望ましい。ただし、大形ロゼットひずみゲージの場合は、約 φ4mm の穴を穿孔する必要があり、測定対象物が比較的大きいものに限定されることに注意する必要がある。

参考文献

- (1) ASTM E837-13a, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method, 2013
- (2) 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
- (3) 三上隆男、松田昌悟、夏井一樹：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）、IIC REVIEW、No.54、2015/10、pp.35-45
- (4) P V Grant, J D Lord, P S Whitehead : The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Drilling Technique, Measurement Good Practice Guide No.53, National Physical Laboratory, 2002



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



計測事業部
計測技術部
福浦グループ
鈴木 優平

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



計測事業部
材料試験部
夏井 一樹

TEL. 045-791-3519
FAX. 045-791-3542