

穿孔法による残留応力測定技術の検証試験

Validation Tests for Residual Stress Measurement Technology by the Hole-Drilling Strain-Gage Method

三上隆男	株式会社 IHI 検査計測	フェロー 博士 (工学)	技術士 (機械部門)
鈴木優平	株式会社 IHI 検査計測	計測事業部計測技術部	
夏井一樹	株式会社 IHI 検査計測	計測事業部材料試験部	
高久泰弘	株式会社 IHI 検査計測	計測事業部材料試験部	
郡 亜美	株式会社 IHI 検査計測	研究開発センター研究開発グループ	

残留応力は、溶接、鍛造、圧延、死荷重など種々の要因によって発生する。残留応力に供用応力が重畳した場合、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。ASTM E837 規格（穿孔法）では、測定対象物の肉厚や応力状態に応じて、3 種類の場合について残留応力測定法を規定している。本規格の妥当性を、引張試験および片持ち梁試験によって既知の応力を与えて、穿孔法による測定結果と比較する方法によって検証した。

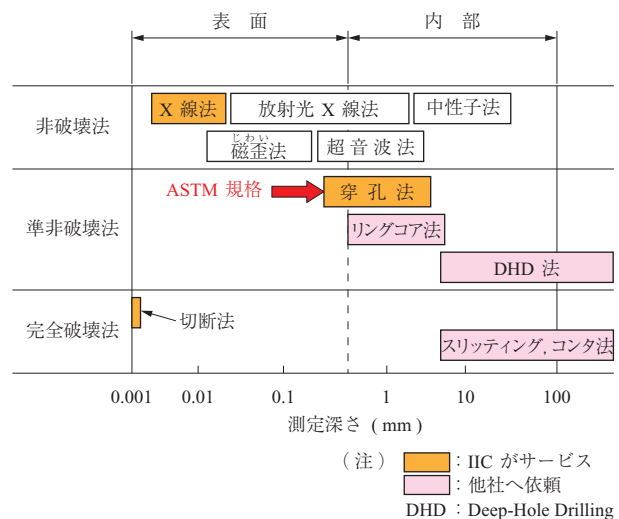
Residual stresses are induced by various factors including welding, forging and dead load. If working stresses are superimposed on the residual stresses present in a component, it is possible that these combined stresses may induce fatigue fractures in the component. Accordingly, it is necessary to measure residual stress and various measurement methods are used for this purpose. The Standard ASTM E837 regulates the hole drilling method and specifies for three kinds of cases in accordance with the thickness and the stress state of a specimen. The effectiveness of this Standard was validated through tensile and bending tests for flat plates in which known stresses were given.

1. 緒 言

残留応力は、外力または温度勾配がない状態で製造またはプロセス処理後に内部に閉じ込められた応力と定義できる。

残留応力は、溶接、鍛造、圧延、死荷重など種々の要因によって発生する。残留応力に供用応力が重畳した場合、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、種々の方法で測定が実施されている。残留応力測定法は、非破壊法、準非破壊法および完全破壊法に大別できる。第 1 図に各種残留応力測定技術と測定深さを示す。

穿孔法は、測定の際に除去する材料の体積が比較的小さく、多くの場合、許容されるか適切に補修できるため、準非破壊法に属している。穿孔システムはポータブルであるため、インフラ（橋梁、プラントなど）の現地計測にも適用されている。その測定手順は ASTM (American Society for Testing and Materials) E837 で規定され、世界中で最も広く使用されている残留応力測定法の一つである。



第 1 図 各種残留応力測定技術と測定深さ
Fig. 1 Residual stress measurement technologies and their measurement depths

最新版の ASTM E837-13a⁽¹⁾ では、以下の三つの重要なケースについて測定手順と解析法を規定している。

- ① 深さ方向に均一な応力分布を有する薄肉試験体
- ② 深さ方向に均一な応力分布を有する厚肉試験体
- ③ 深さ方向に不均一な応力分布を有する厚肉試験体

これらの規定の妥当性を検証した試験に関する報告が公開されておらず、また発表論文も見当たらないため、これらの3ケースについてIICで検証試験を実施した結果の概要を報告する。

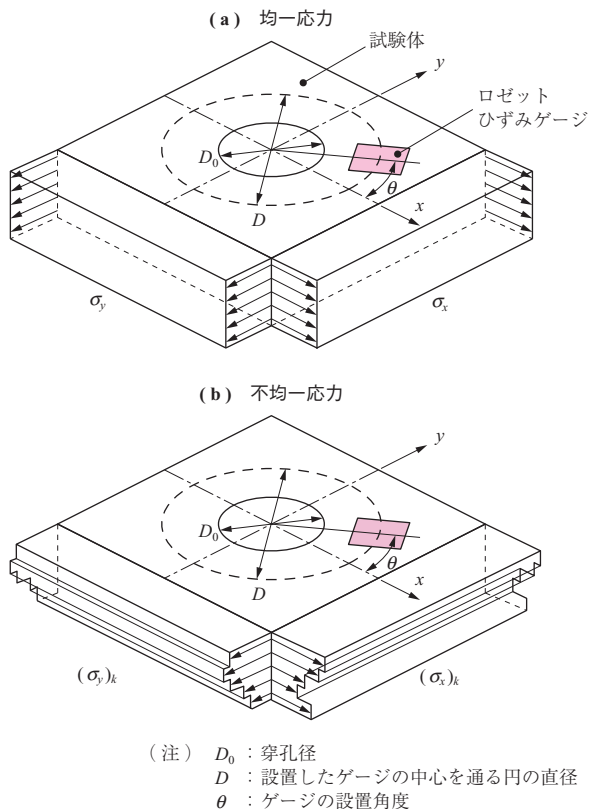
2. ASTM E837-13a 規格の概要

第2図に穴形状と残留応力を示す。試験体内部の応力が深さ方向に均一な場合(第2図-(a))と不均一な場合(第2図-(b))について規定している。

測定にはロゼットひずみゲージを用いるが、その典型的な形状を第3図に示す。

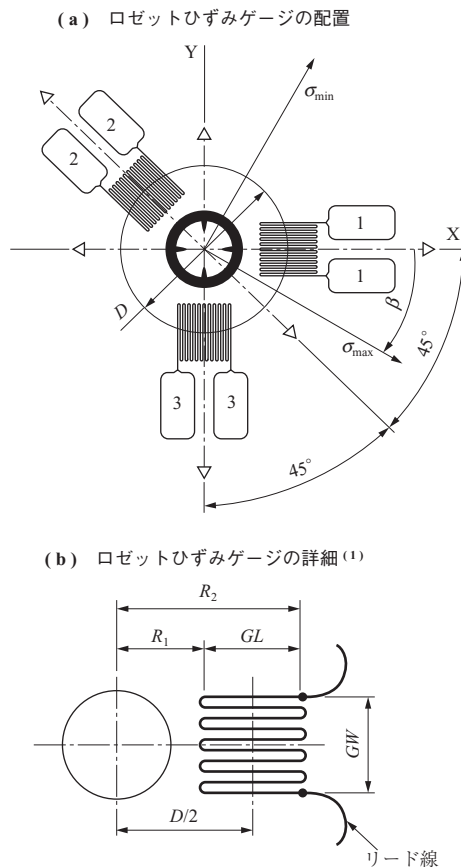
試験体の厚さは薄肉と厚肉に分類されるが、その分類は、穿孔測定に用いるロゼットひずみゲージのサイズ(第2図に示すゲージ中心を通る円の直径 D)に依存し、肉厚が $0.2D$ 以下の場合を薄肉、 $1.0D$ 以上の場合を厚肉と規定している。一般的によく使用される中形ゲージは $D = 5.14 \text{ mm}$ であり、約 1 mm 以下が薄肉、約 5 mm 以上が厚肉となる。小形ゲージ($D = 2.57 \text{ mm}$)では、これらの $1/2$ の厚さとなり、大形ゲージ($D = 10.28 \text{ mm}$)では2倍になる。

計測に際し、ロゼットひずみゲージ中心のマーキング位



(注) D_0 : 穿孔径
 D : 設置したゲージの中心を通る円の直径
 θ : ゲージの設置角度

第2図 穴形状と残留応力⁽¹⁾
 Fig. 2 Hole geometry and residual stresses⁽¹⁾



(注) \triangleright : 各ひずみゲージの受感方向
 β : X軸から時計回りに測った σ_{\max} の方向
 σ_{\max} : 最大主応力方向
 σ_{\min} : 最小主応力方向(σ_{\max} に直交する)
 1~3 : ロゼットひずみゲージの番号
 D : ゲージ中心を通る円の直径
 GL : ゲージ長さ
 GW : ゲージ幅

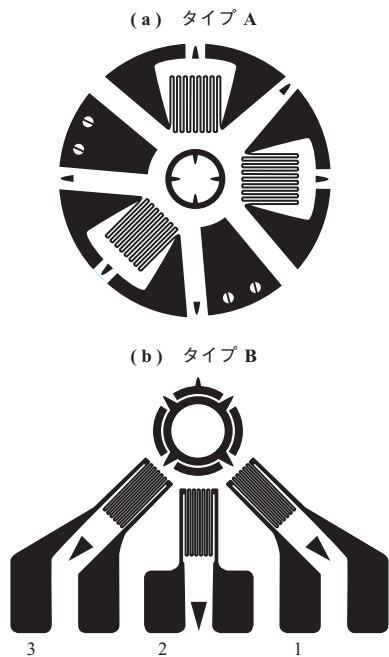
第3図 典型的なロゼットひずみゲージの形状⁽¹⁾
 Fig. 3 Schematic geometry of a typical hole-drilling rosette⁽¹⁾

置をドリルで穿孔するが、その穿孔径(第2図に示す D_0)は D に依存し、ロゼットひずみゲージのサイズに応じて、約 $1, 2 \text{ mm}$ および 4 mm である。薄肉の場合は、貫通穴を用い、厚肉の場合はブラインド穴を用いる。ブラインド穴の場合の穿孔深さ(測定深さ)はそれぞれ、 $0.5, 1 \text{ mm}$ および 2 mm である。

ロゼットひずみゲージの形状は、タイプA、タイプBおよびタイプCの3種類が規定されているが、広く使用されているタイプAとタイプBの形状を第4図に示す。タイプB(第4図-(b))はゲージが片側に寄せられており、溶接隅肉部などの狭い部の測定に役立つ形状である。

3. 検証試験方法

一般的に、構造物内の残留応力は未知であるため、平板試験体に引張りや曲げ荷重によって既知の応力を負荷して、穿孔法による測定結果と比較する方法を採用した。



第 4 図 穿孔法用ロゼットひずみゲージ⁽¹⁾
Fig. 4 Hole-drilling rosette strain gage⁽¹⁾

3.1 深さ方向に均一な応力分布を有する薄肉試験体

本試験は、最新版に改定される前の ASTM E837-08⁽²⁾規格に準拠して実施した。この規格では、薄肉試験体の肉厚 t は $0.4 D$ 以下と規定されており、本試験では $D = 5.14 \text{ mm}$ のゲージを採用して $t = 2.0 \text{ mm}$ とした。試験体は SM490 (溶接構造用圧延鋼材) 製の薄肉平板 ($390 L \times 25 b \times 2 t$) とした。また、試験体の機械加工などによって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。第 5 図に薄肉平板試験体の

1 軸引張試験を示す。

3.1.1 初期残留応力の測定

試験体は後述するように 3 体用意し、引張試験機に設置する前に、無負荷状態で 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で測定した。この結果を第 1 表に示す。なお、 σ_{\max} 、 σ_{\min} はそれぞれ、最大、最小主応力を示し、X 線法の括弧内の値は信頼性限界である。

3.1.2 解放ひずみの測定

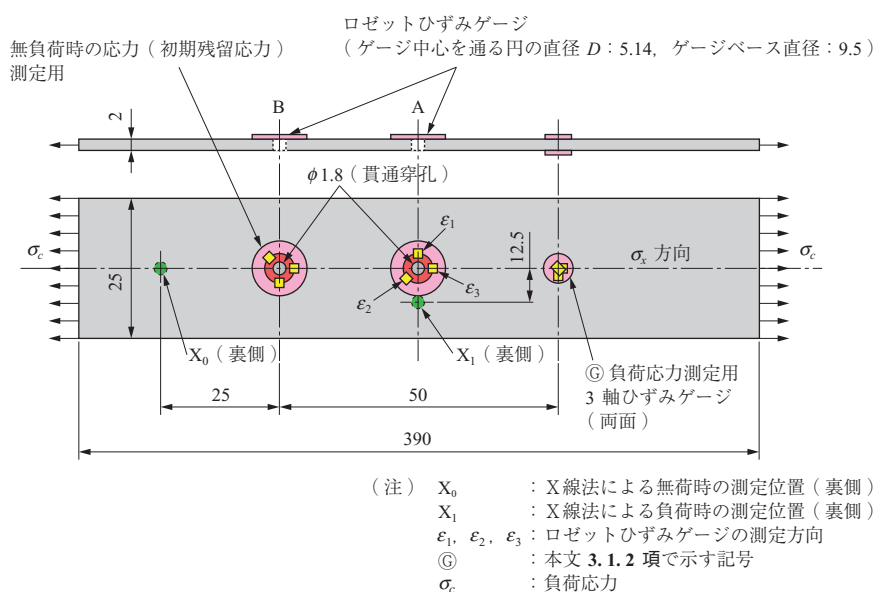
理想的には引張試験機による負荷試験中に穿孔し、解放されるひずみを測定することが望ましい。しかし、上下方向に設置した試験体を負荷試験中に横方向から穿孔すると試験体が薄肉のため、ドリルの推力によって試験体が曲げ変形し、穿孔測定の精度に影響を及ぼす可能性がある。このため、次のような方法を採用した (第 5 図および第 2 表を参照)。

- ① A 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 ϵ' を測定する。

第 1 表 薄肉試験体の初期残留応力測定結果
Table 1 Measured initial residual stresses on the thin specimen

ケース No.	試験荷重 (MPa)	穿孔法 ^{*1} σ (MPa)		X 線法 ^{*2} σ_x (MPa)
		max	min	
1	100	8.0	3.3	-17.8 (± 20.8)
2	150	5.2	2.5	-13.9 (± 15.5)
3	200	12.2	6.1	-13.9 (± 20.2)

(注) *1 : 第 5 図に示す B の測定点
*2 : 第 5 図に示す X_0 の測定点
() : 信頼性の限界値



第 5 図 薄肉平板試験体の 1 軸引張試験 (単位: mm)
Fig. 5 Uniaxial tensile testing of a thin flat plate (unit: mm)

第 2 表 A 点の解放ひずみ測定結果
Table 2 Relaxed strain at Location A

ケース No.	試験荷重 (MPa)	測定ひずみ方向 ε	穿孔前 ε' $10^{-6}(\mu)$	穿孔後 ε'' $10^{-6}(\mu)$	解放ひずみ $\varepsilon = \varepsilon'' - \varepsilon'$ $10^{-6}(\mu)$
1	100	1	-131	-76	55
		2	194	117	-77
		3	434	294	-140
2	150	1	-184	-91	93
		2	319	226	-93
		3	665	444	-221
3	200	1	-239	-116	123
		2	442	298	-144
		3	883	586	-297

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。

③ A 点が穿孔された状態で、①の所定の応力を負荷し、このときのひずみ ε'' を測定する。

④ 解放ひずみ $\varepsilon = \varepsilon'' - \varepsilon'$ を計算する。

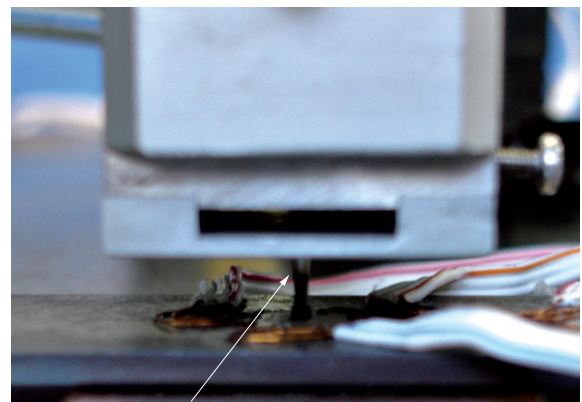
なお、①と③では、 X_1 点（試験体裏側）を X 線法で測定する。また、試験体の表裏の対称位置に設置した 3 軸ひずみゲージ（第 5 図に示す㊸）によって試験中の負荷応力と曲げ応力をモニタリングする。

3.1.3 試験結果

試験体は 3 体用意し、負荷応力 σ_c は 3 ケース（ケース 1：100 MPa、ケース 2：150 MPa、ケース 3：200 MPa）について試験した。

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）から材料のヤング率 E とポアソン比 ν を求めた。この結果、 $E = 211$ GPa、 $\nu = 0.3$ が得られたので、以降の解析ではこれらの値を用いる。

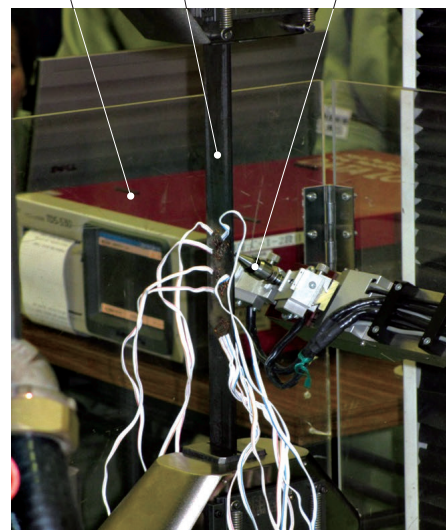
第 6 図に貫通穿孔時の穿孔部の拡大写真を、第 7 図に引張試験機（最大荷重能力 100 kN）による薄肉平板試験体の引張試験の様子を示す。薄肉平板試験体が上下のチャックで垂直方向に保持されており、ひずみゲージからのリード線はデータロガーに接続されている。データロガーには、引張試験機のデータ（荷重と変位）も入力されている。第 7 図はひずみ測定前に、X 線法によって試験体裏面の X_1 位置の残留応力を測定する様子を示す。右側から試験体の裏面にアクセスし、コリメータ（X 線を照射する部分）を試験体の長手方向にスキャンして側傾法に基づいて測定した。この試験では、前項で述べたように、穿孔前後の指示ひずみの差から間接的に 3 方向の解放ひずみを測定した。



ドリル ($\phi 1.6$ mm)

第 6 図 貫通穿孔時の穿孔部の拡大写真
Fig. 6 Enlarged photo of the drilling head during penetrating plate

データロガー 試験体 コリメータ



第 7 図 薄肉平板試験体の引張試験の様子（ケース 1）
Fig. 7 Status of the tensile test (Case 1)

第 8 図に試験体に接着した各種ひずみゲージの写真 (ケース 1) を示す。左端と中央はロゼットひずみゲージ (外径: 約 9.5 mm) で、左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。右端の小さなゲージは負荷応力モニタリング用の 3 軸ひずみゲージである。

第 2 表に第 5 図に示す A 点の解放ひずみ測定結果を示す。

測定された解放ひずみから、ASTM E837-08 の計算式を用いて第 5 図に示す A 点の応力を計算した。この場合、穿孔した穴径 D_0 が校正定数 \bar{a} と \bar{b} に直接的に関係するので、穿孔装置に備え付けられている顕微鏡によって精密に穴径を測定した。

次に、 D_0/D を計算し、均一応力場の貫通穴に対する校正定数の表から、補間計算に基づき \bar{a} と \bar{b} を求めた。なお、 \bar{a} と \bar{b} は、ロゼットひずみゲージのサイズと穴径に依存する無次元の校正定数である。第 3 表に A 点の残留応力測定結果を示す。

3.1.4 考 察

第 3 表から、ケース 1 ~ ケース 3 の残留応力解析結果 σ_{\max} は負荷応力に対して 3 ~ 8% の誤差で計測されていることが分かる。1 軸引張試験の場合、 σ_{\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、それらの値は無視できるほど小さい。3.1.1 項で述べたように第 5 図に示す B 点に引張の初期残留応力が存在していたが、A 点においても B 点と同程度の初期残留応力が存在していると考えられるが、3.1.2 項で述べた特別な手順で解放ひずみを測定しているため、この初期残留応力の影響は排除されている。



第 8 図 試験体に接着した各種ひずみゲージの写真 (ケース 1)
Fig. 8 Various strain gages on the specimen (Case 1)

β は最も近い主軸からゲージ No. 1 (ϵ_1 方向) への角度である。本試験では第 5 図に示すようにロゼットひずみゲージは ϵ_1 を試験体の幅方向に、 ϵ_3 を長手方向になるように接着しているので、 β は σ_{\min} の方向であり、これと直交する方向が σ_{\max} である。1 軸引張試験では β は理論的にはゼロであるが、測定誤差の影響でゼロになっていないものと考えられる。

穿孔法の測定誤差には種々の因子が影響するが、ASTM E837 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って、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であり、均一応力場を有する薄肉平板試験体の残留応力測定法の信頼性を実証することができた。本試験の詳細については参考文献 (3) を参照願う。

3.2 深さ方向に均一な応力分布を有する厚肉試験体

本試験も、最新版に改定される前の ASTM E837-08 規格に準拠して実施した。この規格では、厚肉試験体の肉厚 t は $1.2D$ 以上と規定されており、本試験では $D = 5.14$ mm のゲージを採用したので、 $t = 10$ mm とし、試験体は SM490 製の厚肉平板 ($390L \times 25b \times 10t$) とした。また、試験体の機械加工などによって生じる初期残留応力をできるだけ小さくするため、SR を施した。第 9 図に厚肉平板試験体の 1 軸引張試験を示す。

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第 9 図に示す 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 ($\phi 6$ mm \times 深さ 0.2 mm) 後に X 線残留応力測定装置で測定した。穿孔法による厚肉試験の初期残留応力測定結果を第 4 表に示す。第 4 表から SR を行っても残留応力が存在していることが分かる。筆者らの経験では、機械加工などによって付与された残留応力は SR を施しても完全には除去されない。

3.2.2 1 軸引張試験中の応力測定

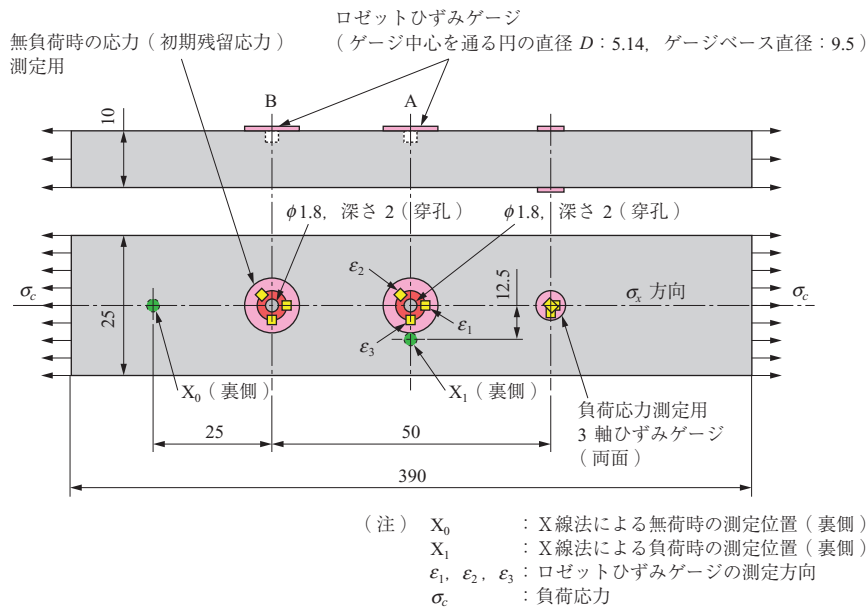
第 10 図に引張試験機 (最大荷重能力 100 kN) による

第 3 表 A 点の残留応力解析結果

Table 3 Calculated residual stresses at Location A

ケース No.	試験荷重 (MPa)	ゲージ中心を通る円の直径 D (mm)	穿孔径 D_0 (mm)	比率 D_0/D	校正定数		解放ひずみ $10^{-6}(\mu)$			残留応力 σ (MPa)		σ_{\min} から ϵ_1 への角度 β ($^\circ$)
					\bar{a}	\bar{b}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	max	min	
1	100	5.14	1.900	0.369 6	0.136 9	0.413 5	55	-77	-140	103	-2	-10
2	150	5.14	1.875	0.364 8	0.133 2	0.404 5	93	-93	-221	161	-5	-5
3	200	5.14	1.890	0.367 7	0.135 5	0.409 9	123	-144	-297	216	-8	-8

(注) A 点: 第 15 図に示す測定点

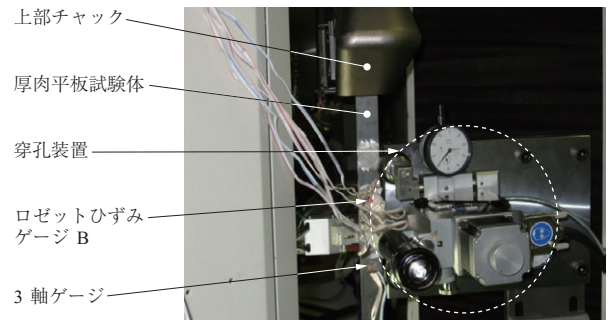


第 9 図 厚肉平板試験体の 1 軸引張試験 (単位: mm)
 Fig. 9 Uniaxial tensile testing of a thick flat plate (unit: mm)

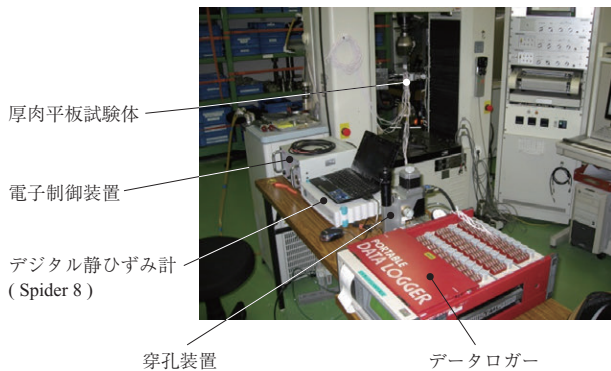
第 4 表 厚肉試験体の初期残留応力測定結果
 Table 4 Measured initial residual stresses on the thick specimen

ケース No.	試験荷重 (MPa)	穿孔法 ^{*1} σ (MPa)	
		max	min
1	100	-9.7	-12.4
2	150	-8.3	-13.0

(注) *1: 第 9 図に示す B の測定位置



第 11 図 穿孔装置の設置状況
 Fig. 11 Installation of the drilling device



第 10 図 厚肉平板試験体の 1 軸引張試験の様子
 Fig. 10 General view of the state of uniaxial tensile test of a thick flat plate test specimen

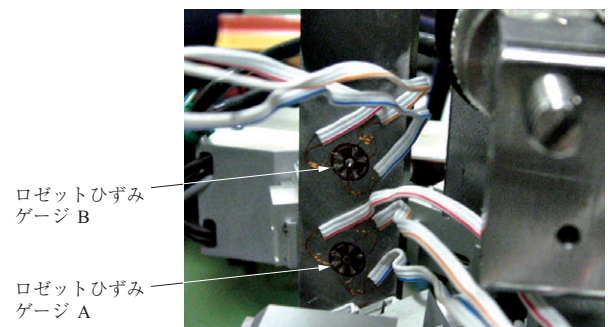
厚肉平板試験体の 1 軸引張試験の様子を示す。

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デジタル静ひずみ計に接続されている。

穿孔作業は試験体が引張試験機に設置された状態で実施するため、穿孔装置は横置きとした。第 11 図に穿孔装置の設置状況を示す。穿孔装置の三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って横置きが

可能になっている。

第 12 図に試験体に接着したロゼットひずみゲージ (ケース 1) を示す。上部のゲージ B は先に述べた初期残留応力測定用で、すで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 で規定されたタイプ A のゲー



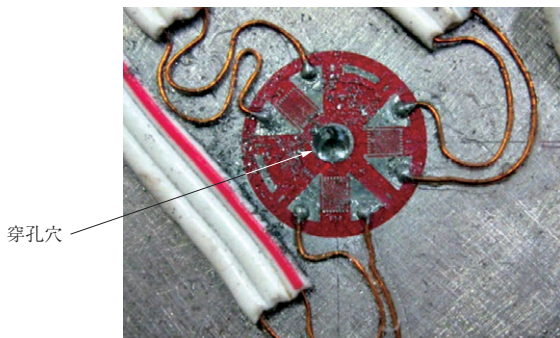
第 12 図 試験体に接着したロゼットひずみゲージ (ケース 1)
 Fig. 12 Rosette strain gages on the 100 MPa specimen (Case 1)

ジ ($D = 5.14 \text{ mm}$) である。第 13 図に穿孔後のロゼットひずみゲージの状況を示す。 $\phi 1.795 \text{ mm}$ の穴が 0.05 mm ステップで深さ 2.0 mm まで穿孔されている。

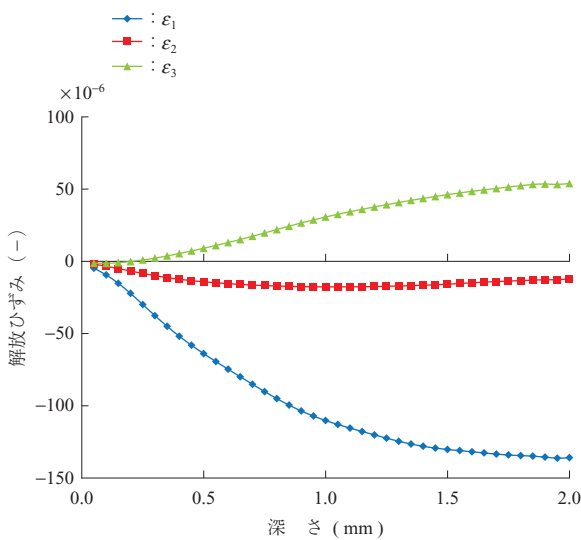
3.2.3 試験結果

第 14 図に、一例として、試験時の解放ひずみ測定結果 (ケース 1) を示す。なお、ケース 2 (200 MPa) の解放ひずみはケース 1 (100 MPa) の約 2 倍となった。

第 5 表に、ASTM E837-08 の均一応力解析手順に基づいた第 9 図に示す A 点の応力測定結果を示す。負荷応力 (試験荷重) は試験機のロードセルで実測した値を示す。



第 13 図 穿孔後のロゼットひずみゲージの状況
Fig. 13 Rosette strain gage after drilling



第 14 図 解放ひずみの測定結果 (ケース 1)
Fig. 14 Measured relaxed strain (Case 1)

試験体の両面に貼り付けた 3 軸ひずみゲージによって、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であり、無負荷時に穿孔することができないため初期残留応力は不明である。そこで、B 点 (第 9 図参照) 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。この結果、 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って異なり、A 点での真の値が不明であり本評価は参考用とし、括弧書きとしている。1 軸引張試験であり 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。A 点には、B 点 (第 4 表参照) よりも大きな初期残留応力が存在していたものと推定される。

3.2.4 考察

初期残留応力の存在が負荷試験時の測定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が、2 ケースの負荷試験で約 -5% 以内の小さな誤差であった。もし、試験体の初期残留応力がゼロであれば、ASTM E837 規格の理論に非常に良く一致すると考えられ、均一応力場を有する厚肉試験体の残留応力測定法の信頼性を実証することができた。本試験の詳細については参考文献 (4) を参照願う。

3.3 深さ方向に不均一な応力分布を有する厚肉試験体

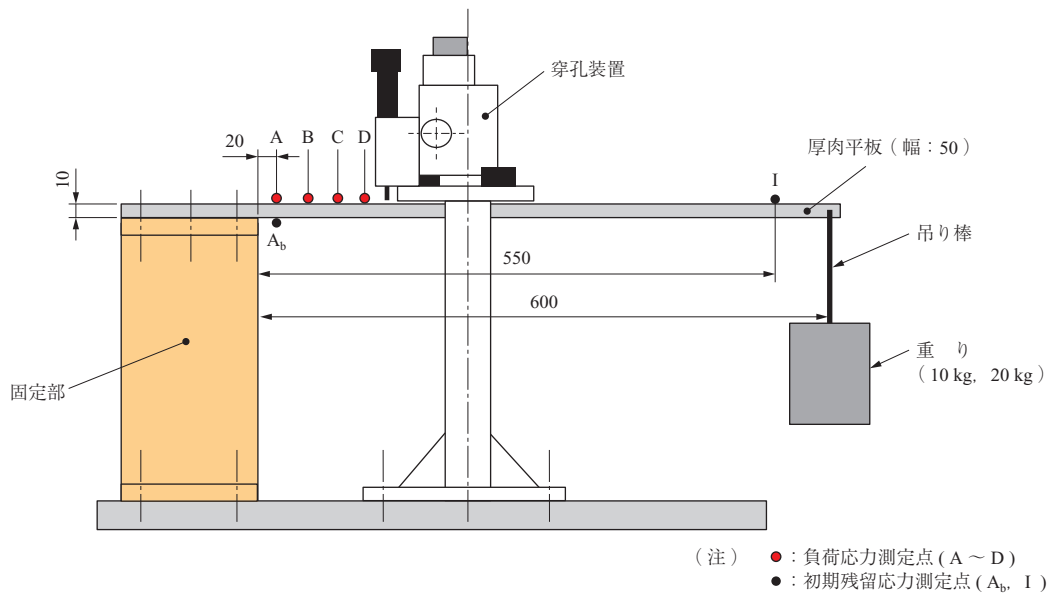
第 15 図に厚肉平板の片持ち梁試験を示す。試験体は SM490 製の厚肉平板 ($600 L \times 50 b \times 10 t$) とし、片持ち梁試験装置を使って自由端側に重りを負荷し、試験体の上面側に引張曲げ応力を発生させる。固定端側に接着した 4 か所のロゼットひずみゲージ位置で、穿孔試験を行い、深さ方向に不均一な曲げ応力を測定する。第 16 図にひずみゲージ配置 (固定端付近) を示す。

試験体の板厚方向には表面から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

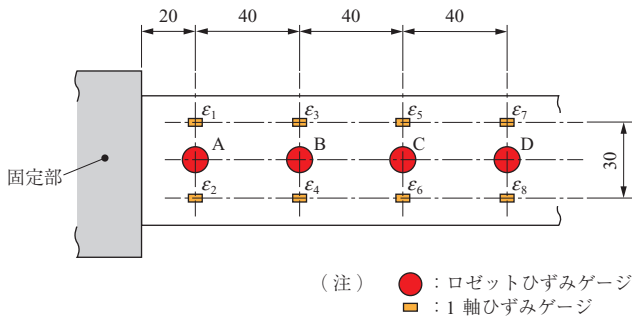
第 5 表 A 点の残留応力測定結果
Table 5 Calculated residual stresses at Location A

ケース No.	試験荷重 (MPa)	ゲージ中心を通る円の直径 D (mm)	穿孔径 D_0 (mm)	比率 D_0/D	残留応力 σ (MPa)		σ_{\max} から ε_1 への角度 β ($^\circ$)	初期残留応力 σ_x (MPa)	σ_{tot} (MPa)	誤差 (%)
					max	min				
1	(98)	5.14	1.795	0.349 2	85.8	-17.3	-8.3	(-7.0)	(92.8)	(-5.3)
2	(197)	5.14	1.775	0.345 3	174.4	-30.5	-3.2	(-13.9)	(188.3)	(-4.4)

(注) A 点: 第 9 図に示す測定点
(): 参考値



第 15 図 厚肉平板の片持ち梁試験 (単位: mm)
Fig. 15 Cantilever testing of a flat plate (unit: mm)



第 16 図 ひずみゲージ配置図 (固定端付近) (単位: mm)
Fig. 16 Arrangement of strain gauges near the fixed end (unit: mm)

論から容易に解析できるので、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って、穿孔法による不均一応力測定技術の妥当性を評価する。

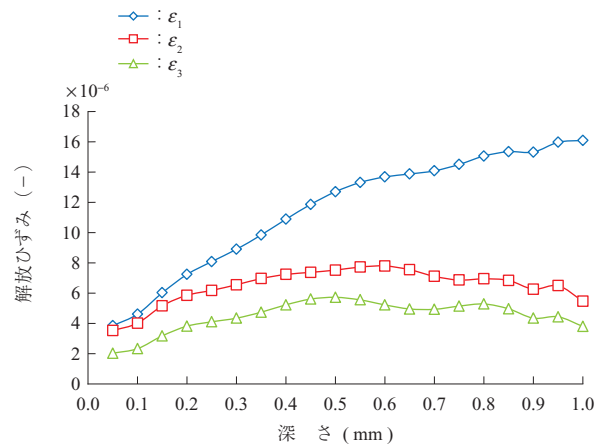
3.3.1 初期残留応力の測定

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、SR を施した。

初期残留応力は試験体の場所によって異なると考えられるが、代表点として第 15 図に示す I 点と A_b 点の初期残留応力を曲げ試験を実施する前に測定した。

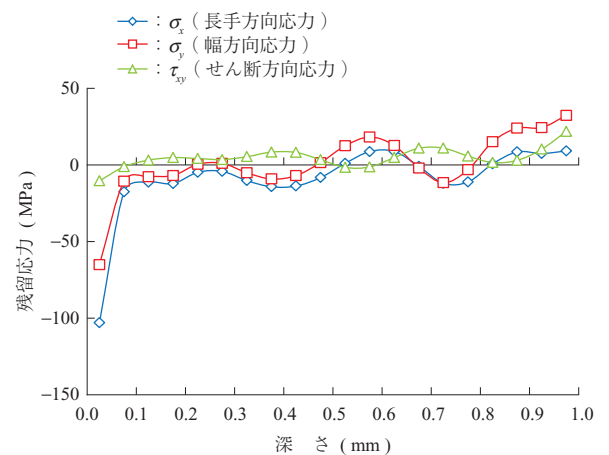
第 17 図に I 点の累積解放ひずみの測定結果を示す。解放ひずみは非常に小さく、デジタル静ひずみ計の測定分解能 ($\pm 1 \mu$) が影響するほどのレベルである。

第 18 図に I 点の初期残留応力の測定結果を示す。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。表層部は機械加工やゲージ貼りのための研磨作業によって付与された圧縮残留応力が残っているが、深さ 0.1 mm



(注) I 点: 第 15 図に示す初期残留応力の測定点

第 17 図 I 点の累積解放ひずみ
Fig. 17 Relaxed strain at Location I



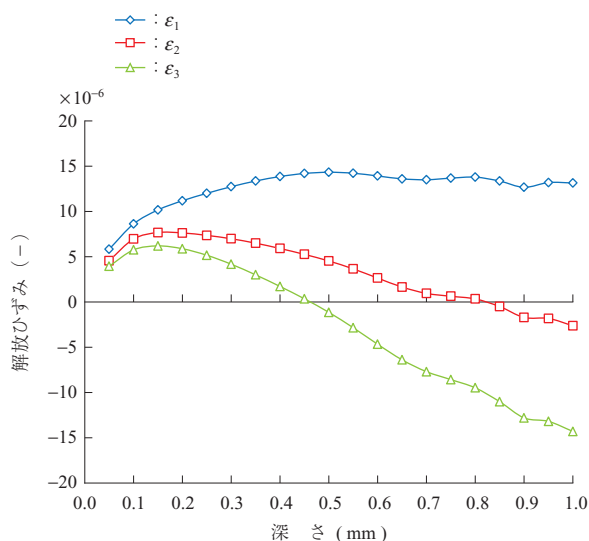
(注) I 点: 第 15 図に示す初期残留応力の測定点

第 18 図 I 点の初期残留応力
Fig. 18 Initial residual stress at Location I

以降は SR の効果によって σ_x 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。

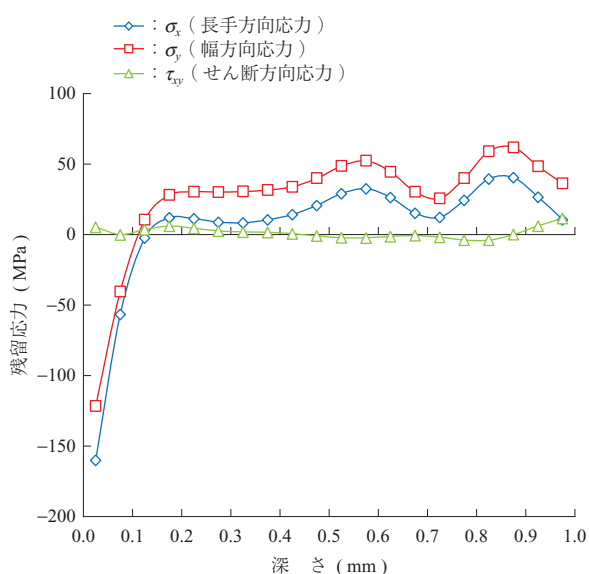
第 19 図に A_b 点の累積解放ひずみの測定結果を示す。解放ひずみは I 点と同様に小さいが、分布は全く異なる。

第 20 図に A_b 点の初期残留応力の解析結果を示す。 σ_x に着目すると、深さ 0.1 mm までの表層部は I 点と同様に機械加工などによって付与された圧縮残留応力が残っているが、I 点とは深さ方向に異なる残留応力分布を有する。これは、 A_b 点は大きな熱容量を有する固定部 ($120 L \times$



(注) A_b 点：第 15 図に示す初期残留応力の測定点

第 19 図 A_b 点の累積解放ひずみ
Fig. 19 Relaxed strain at Location A_b



(注) A_b 点：第 15 図に示す初期残留応力の測定点

第 20 図 A_b 点の初期残留応力
Fig. 20 Initial residual stress at Location A_b

$120 b \times 10 t$) に近く、SR 後の冷却過程における試験体内部の温度変化や温度分布が I 点とは相違し、生成される残留応力が異なるためと考えられる。

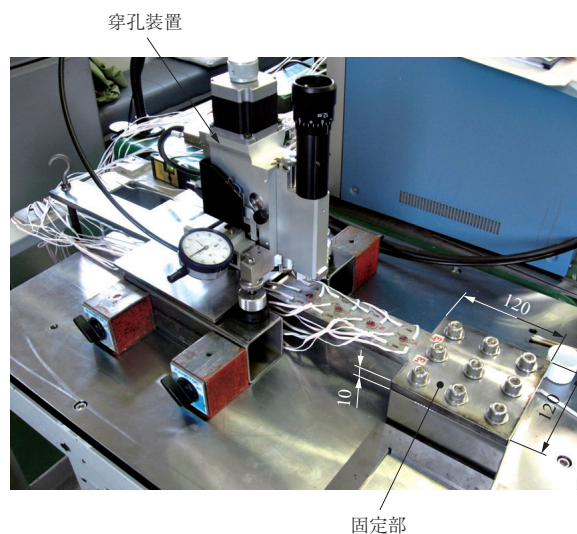
3.3.2 負荷応力測定結果

片持ち梁試験装置に穿孔装置をセットした状態を第 21 図に示す。

第 15 図に示す A, B, C 点の測定時には 20 kg の重りを、D 点の測定時には 10 kg の重りを負荷した。第 6 表に、A ~ D 点における表層部の最大曲げ応力の解析値と測定値比較を示す。梁理論による解析と 1 軸ひずみゲージによる測定結果は非常に良く一致した。

代表的な A 点と D 点の累積解放ひずみの測定結果を、それぞれ第 22 図と第 23 図に示す。

これらの累積解放ひずみを基に、ASTM E837 規格の計算式によって解析した。A ~ D 点の残留応力の測定結果と梁理論との比較をそれぞれ第 24 図 ~ 第 27 図に示す。穿孔法では死荷重による応力も含んだ真の応力が測定され



第 21 図 片持ち梁試験装置に穿孔装置をセットした状態 (単位：mm)

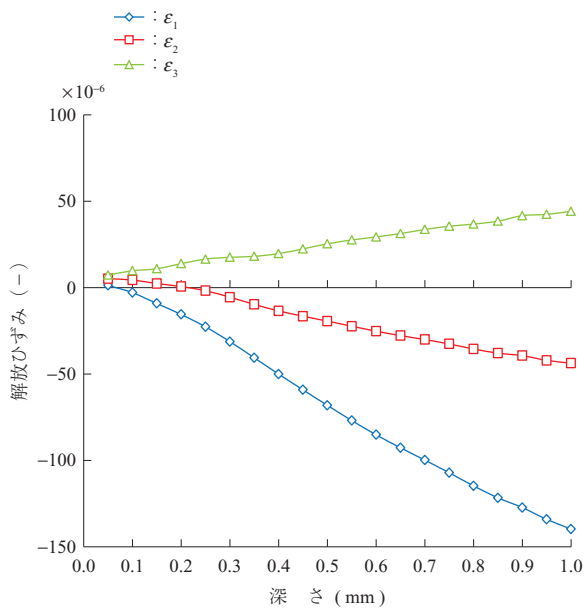
Fig. 21 General view of the state in which a drilling device is set in a cantilever testing apparatus (unit : mm)

第 6 表 表層部の最大曲げ応力の解析値と測定値比較

Table 6 Comparison between calculated and measured maximum bending stresses

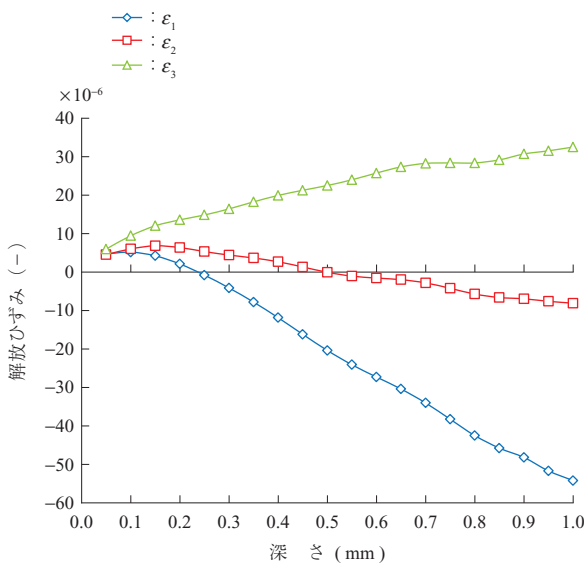
測定点	負荷質量 (kg)	最大曲げ応力 σ_{max} (MPa)		
		梁理論値 b	1 軸ひずみゲージ値 S	誤差 b/S (%)
A	20.6	140.5	139.7	+0.6
B	20.6	130.8	130.8	0.0
C	20.6	121.1	121.3	-0.2
D	10.6	57.3	57.4	-0.2

(注) A ~ D：第 15 図に示す測定点



第 22 図 A 点の累積解放ひずみ
Fig. 22 Relaxed strain at Location A

(注) A 点: 第 15 図に示す測定点



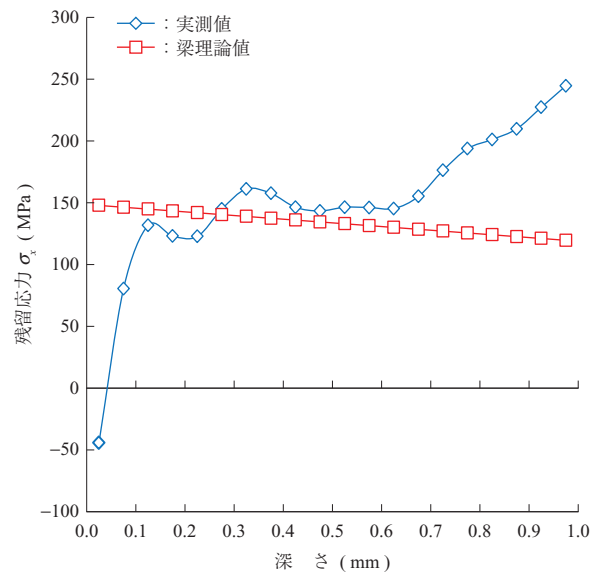
第 23 図 D 点の累積解放ひずみ
Fig. 23 Relaxed strain at Location D

(注) D 点: 第 15 図に示す測定点

るので、これらの図には比較のため、平板の自重（約 2.4 kg）による曲げ応力を考慮した梁理論による解析結果を示す。

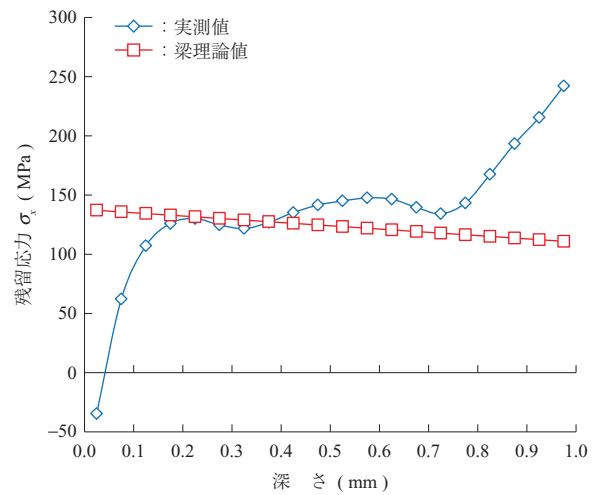
3.3.3 考 察

先に述べたように、表面近傍では機械加工などによって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 ~ D 点の初期残留応力は不明であるが、A ~ D 点の初期残留応力を試験体裏側の A_b 点での測定結果（第 20 図に示す σ_x ）と仮定すると、深さ 0.025 mm の位置で、約 -170 MPa の圧縮



第 24 図 A 点の残留応力の測定結果と梁理論との比較
Fig. 24 Comparison between the measured residual stress and the calculated stress by beam theory at Location A

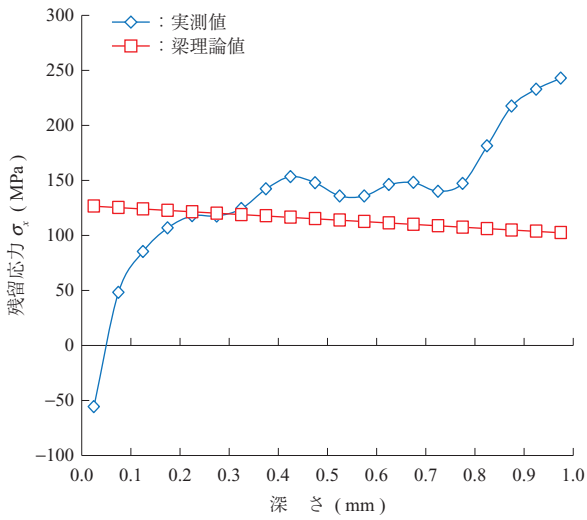
(注) A 点: 第 15 図に示す測定点



第 25 図 B 点の残留応力の測定結果と梁理論との比較
Fig. 25 Comparison between the measured residual stress and the calculated stress by beam theory at Location B

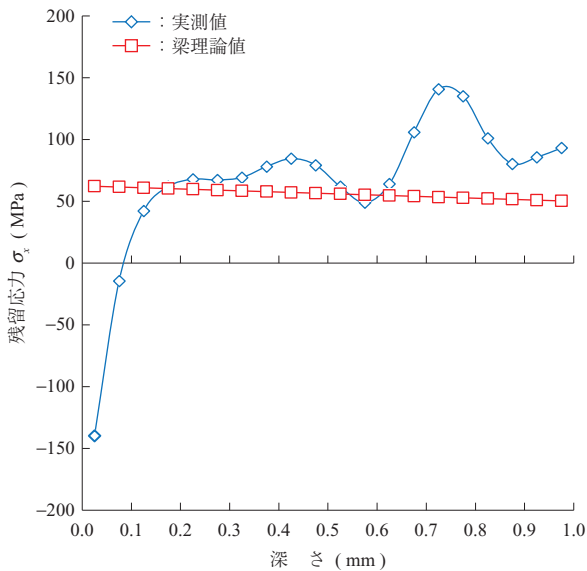
(注) B 点: 第 15 図に示す測定点

応力が存在している。これに、重り負荷による曲げ応力が重畳しても圧縮応力が残る。これが、A ~ D 点（第 24 図 ~ 第 27 図参照）で深さ約 0.05 mm までに観察される圧縮応力の原因になっている。深さ約 0.1 ~ 0.3 mm 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。これも第 20 図に示すような初期残留応力の影響と考えられる。SR 後の冷却過程における試験体内部の温度変化や温度分布が残留応力の生成に大きな影響を及ぼしており、厚肉試験体では内部に引張残留応力が生成されやすいと考えられる。ただ



(注) C点：第15図に示す測定点

第26図 C点の残留応力の測定結果と梁理論との比較
Fig. 26 Comparison between the measured residual stress and the calculated stress by beam theory at Location C



(注) D点：第15図に示す測定点

第27図 D点の残留応力の測定結果と梁理論との比較
Fig. 27 Comparison between the measured residual stress and the calculated stress by beam theory at Location D

し、外力が作用していないので残留応力は内部平衡しており、表層部が圧縮応力であり、内部では引張応力となって試験体全体では釣り合っているはずである。

結論として、第24図～第27図の梁理論からかい離れた部分に相当する初期残留応力がA～D点の位置に存在していたものと考えられる。

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すべての位置で梁理論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って、深さ方向全体で梁理論と完全に一致することを確認することができなかった。しかし、本試験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ものと考えられる。本試験の詳細については参考文献(5)を参照願う。

4. 結 言

穿孔法は ASTM E837 規格で規定された残留応力測定法であるが、筆者らは測定サービスを提供している立場から、その妥当性を確認するべきであると考え、肉厚や深さ方向に応力分布が異なる3種類の試験体について引張試験や片持ち梁試験によって検証を行った。この結果、すべての試験で、本規格の妥当性を検証することができた。

本規格のなかでは、深さ方向に不均一な応力分布を有する試験体の測定に関する規定が最も重要である。なぜなら、測定対象の工業部品は、深さ方向に均一な応力分布を有することはまれであり、ほとんどの場合、不均一な応力分布を有するからである。ASTM E837 規格は、2001年に初版が発行され、その当時は均一応力場のみの規定であった。その後2008年に改訂され、不均一応力場についての規定が追加された。これによって、穿孔法が飛躍的に脚光を浴びるようになった。直近では2013年に改定されて ASTM E837-13a 規格となったが、この直近の改定では均一応力分布に関する規定を簡素化するとともに、明らかに均一応力分布と予測される場合を除いて、すべての試験体に対して不均一応力分布を有していることを前提に測定するように推奨している。

穿孔法は、3種類のサイズのロゼットひずみゲージとドリル径に対応して深さ方向に0.5、1 mm および2 mmまでの残留応力分布を測定でき、主応力とその方向も解析することができる。穿孔装置はエアタービン駆動とモータ駆動の2種類があり、システムはポータブルなので、鋼橋のウェブ部やプラント配管溶接部などの現地測定などにも適用されている。また、穿孔法はプラスチック材料⁽⁶⁾や異方性材料(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics, GFRP: Glass Fiber Reinforced Plasticsなどの積層体)にも適用範囲が広がっている。

本検証試験をとおして、あらためて ASTM E837 規格の優秀さを認識することができた。今後とも、穿孔法に対する多様な測定ニーズに応じていく所存である。

参考文献

- (1) Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method: ASTM E837-13a (2013.10) pp. 1 - 16
- (2) Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method: ASTM E837-08 (2008.4) pp. 1 - 17
- (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年10月 pp. 39 - 45
- (4) 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年4月 pp. 37 - 47
- (5) 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年10月 pp. 35 - 45
- (6) 三上隆男, 夏井一樹, 福本伸太郎: 穿孔法によるプラスチック材料の残留応力測定技術 IIC REVIEW No. 55 2016年4月 pp. 30 - 37