

## 大きな圧縮歪を受けた鋼構造部材の 亀裂強度（その1）

矢島 浩\*・西川 和人\*・高 允宝\*  
佐藤 進\*・山本 元道\*\*

### Crack Initiation Strength of Structural Steel Members Having Experienced Large Compressive Strain (1st Report)

YAJIMA Hiroshi, NISHIKAWA Kazuto, KHO Yunbo,  
SATO Susumu and YAMAMOTO Motomichi

#### SUMMARY

It is known that compressive plastic strain deteriorates the ductility and fracture toughness of steels. So when structural members encountered buckling collapse is subjected to cyclic load, cracks may easily initiate at the concave side (compressive side) of buckling deflection.

In this paper, an attempt was made to quantify the crack initiation strength for structural steel members having experienced large compressive prestrain. A tensile test for prestrained material and a crack initiation test for strip specimens were performed on JIS SS 400 steel. In the former tests, the influence of prestraining on the mechanical properties of material was investigated, while in the latter the specimens were bent into various curvatures after undergoing buckling and the relationship between crack initiation and applied straining was examined.

Moreover, an attempt was made to investigate the crack initiation behavior for structural steel members subjected to cyclic bending load after undergoing buckling collapse. For this purpose, crack initiation tests for strip specimens under cyclic bending load were performed. For different cyclic loading conditions indicated by various displacement amplitude of the loading point, distribution of strain on specimen at the bending buckling state, and number of cycles at crack initiating was examined.

Elastoplastic large deformation FEM analyses were also performed on the strip specimens to investigate stress and strain distributions at the crack initiation site.

As a result of this study, the following conclusions were obtained :

- (1) With the increase in compressive prestrain, elongation of material is decreased, while ultimate tensile strength is increased. True fracture stress shows smaller dependency on the magnitude of pre-

---

\* 工学部 機械工学科

\*\* 広島大学 大学院 工学研究科  
2001年9月27日受付

strain.

- (2) For the strip specimens subjected to more than 40~55% of compressive strain at the concave side of bending, initiation of surface hair cracks was observed when unloaded.
- (3) According to the FEM analyses, large tensile residual stress is induced at the concave side of bending when unloaded, and this is considered to be a primary cause of crack initiation.
- (4) It is possible to assess the crack initiation by comparing the hydrostatic component of residual stress with ultimate tensile strength and/or true fracture stress of prestrained material.
- (5) For the strip specimens subjected to cyclic load after undergoing buckling collapse, crack initiated earlier at the center of width on the compressive side than at the edge on the tensile side.
- (6) According to the FEM analyses, the largest stress was induced at the center of width on the compressive side.
- (7) Relationship between the strain at the crack initiation points and number of cycles at crack initiating can be expressed by a linear function on logarithmic scale.

## 1. はじめに

大型船舶の船体用鋼板として大量に使用されている、一般船体用軟鋼板あるいは船体用50キロ級高張力鋼板では、圧縮の塑性変形（圧縮歪）を受けると、伸び・絞り小さくなり、破壊靱性値が低下することが知られており、圧縮歪による材質の劣化（脆化）に関しては、これまでに多くの研究が行なわれている<sup>1)~3)</sup>。部材が座屈崩壊した後、引き続き変動荷重を受けると、座屈撓みの内側（圧縮側）から容易に亀裂が発生<sup>4)</sup>して、座屈崩壊した部材が破断してしまい、座屈崩壊が大破壊への引き金となることが、実際の損傷例で確認されている<sup>5)</sup>。

本報では、軸力圧縮予歪材を用いた引張試験により、圧縮予歪が材料の機械的性質（引張強さ、真破断応力など）に及ぼす影響に関して調査した。さらに、帯板試験片による大変形曲げ亀裂発生試験を実施し、座屈後大きな曲げ変形を受けた後の除荷過程で、座屈撓み内側（圧縮側）から発生する亀裂について調査・検討し、亀裂発生限界条件の定量的な評価を試みた<sup>6)</sup>。

また、座屈崩壊後引き続き大きな圧縮および引張りの繰り返し荷重を受ける鋼構造部材の、亀裂発生現象に関して定量的な評価を試みた<sup>7)</sup>。

なお、単純な曲げ荷重による低サイクル疲労に比べて、歪集中の度合いが顕著である、座屈崩壊後の繰り返し曲げ荷重下での亀裂発生強度に注目した。特に、最初に圧縮歪を受けたことによる影響に注目して、座屈撓みの内側（圧縮側）と外側（引張側）での亀裂発生現象に関して定量的な評価を試みた。

## 2. 軸力圧縮予歪材の引張試験

### 2.1 軸力圧縮予歪材の製作

供試鋼は、板厚29mmのJIS一般構造用圧延鋼材SS400（一般船体用軟鋼板と同等）で、ミルシートによる化学成分と機械的性質をTable 1に示す。また、供試鋼板母材のミクロ組織をFig. 1に示す。

Fig. 2(a)に示す形状および寸法で、その長さ方向が供試鋼板圧延方向と一致するように採取した試験片を供試して、100tonf万能試験機により、室温で軸圧縮予歪材を作製した。S字変形および

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of tested steel plate (JIS SS 400)

Chemical Composition (%)					Mechanical Properties		
C	Si	Mn	P	S	Y.P. (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.S. (kgf/mm <sup>2</sup> )	El. (%)
0.17	0.14	0.90	0.013	0.004	28.0	44.5	28

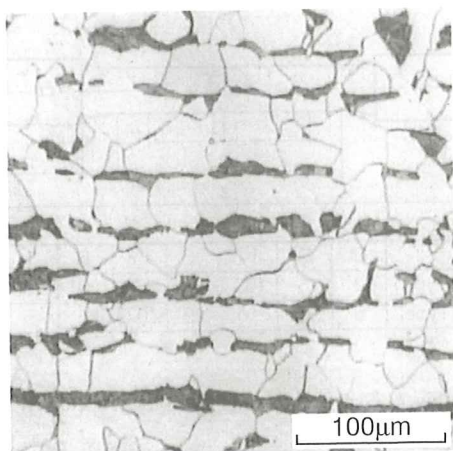


Fig.1 Microstructure of tested steel plate

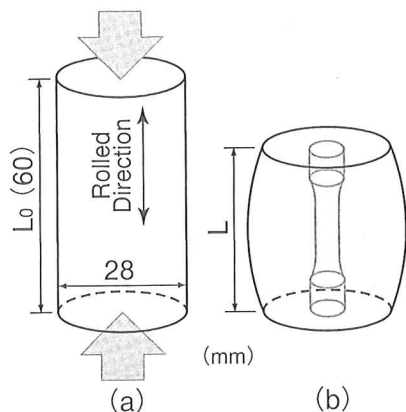


Fig.2 Axially prestrained specimen in compression

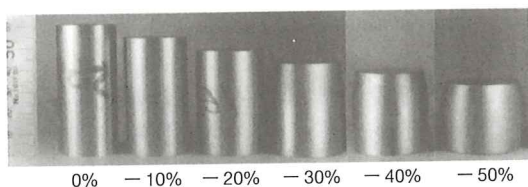


Fig.3 Shapes of specimens after prestraining in compression

樽型変形を最小限に抑えるために試験片断面は円形とし、圧縮荷重の負荷に際しては、負荷面に潤滑剤として二硫化モリブデンを塗布した。予歪量は負荷前後の試験片軸方向長さより求めた。

予歪量-5、-10、-20、-30、-40、-50%の6種類の軸圧縮予歪材を作製した。予歪量-10～

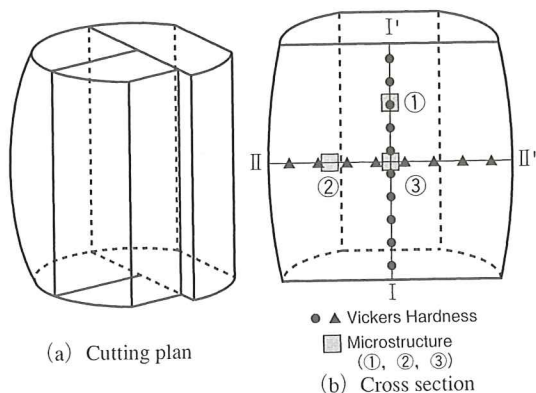


Fig.4 Location for measuring Vickers hardness and microstructure

-50%負荷後および母材（予歪量0%）の試験片形状をFig.3に示す。予歪量が-20%を越えると樽型変形、S字変形が顕著になり、後述する引張試験の結果に少なからず影響を及ぼしたものと考えられる。

圧縮荷重負荷後、試験片をFig.4(a)に示すように切断し、切断面を研磨、エッチング処理した後、ミクロ組織調査およびビッカース硬さを計測した。予歪量-40%を与えた試験片中央部のミクロ組織をFig.5に示す。Fig.5に示したミクロ組織は、Fig.4(b)に示す3箇所では調査したものである。Fig.5から明らかなように、それぞれの位置において圧縮荷重を受け組織は扁平化しているが、変形の状態が位置によって少し異なっている。これは、圧縮時に発生した樽型変形およびS字変形の影響であると考えられる。ビッカース硬さ計測位置をFig.4(b)に、また予歪量-40%を与えた試験片のビッカース硬さ分布の例をFig.6に示す。Fig.6の中の実線は、母材の硬さの平均値である。長さ方向の硬さ分布、幅方向の硬さ分布とも、少しばらつきはみられるが、試験片中央部の硬さは220～230HV程度になっており、母材に比べてかなり硬化している。

## 2.2 引張試験とその結果

軸圧縮予歪材から、Fig.2(b)に示したように引



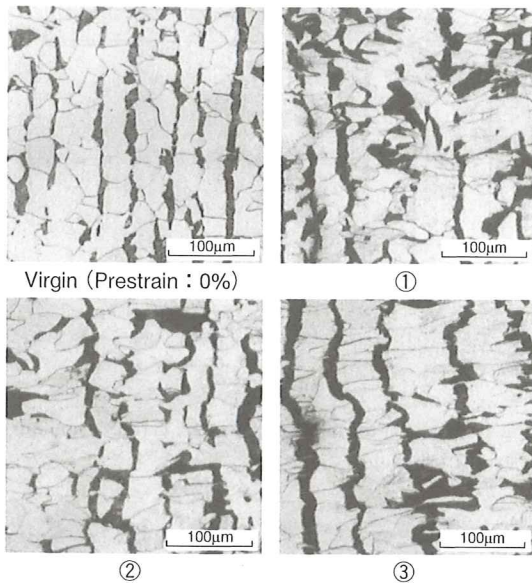


Fig.5 Microstructures of virgin specimen and pre-strained specimen in compression (prestrain: -40%)

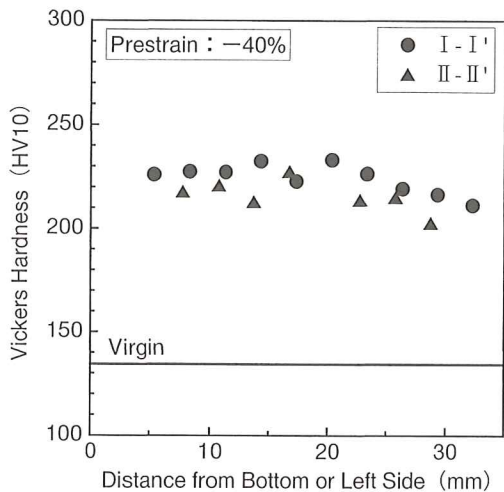


Fig.6 Vickers hardness distribution (prestrain: -40%)

張試験片を切り出し、室温にて引張試験を行なった。軸圧縮予歪材がS字変形を生じた場合も、上下両負荷面に対して垂直に引張試験片を切り出した。引張試験片の形状および寸法をFig.7に示

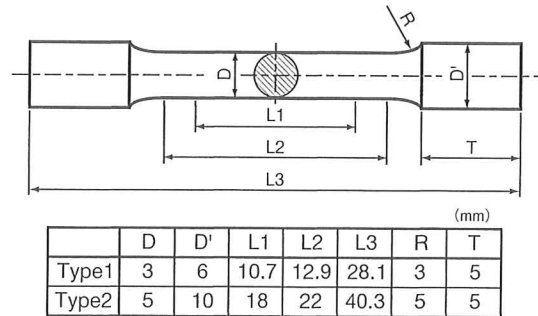


Fig.7 Shape and size of tension test specimen

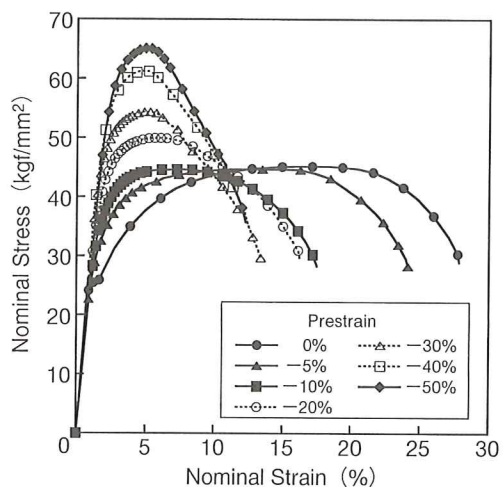


Fig.8 Influence of prestrain on nominal stress—nominal strain curve

す。軸圧縮予歪材作製時、S字変形の発生による寸法の制約があったため、直径5mmの試験片と直径3mmの試験片を併用した。引張試験には10 tonf オートグラフを用いた。

直径3mm試験片による室温引張試験の公称応力～公称歪線図を、Fig.8に示す。Fig.8で明らかのように、圧縮予歪量が増加するにつれ、伸びが減少し、引張強さが増加している。圧縮予歪量と伸びとの関係をFig.9に示す。直径3mmの試験片の場合、標点間外側のR基部付近で破断した試験片が多く、正確な伸びは計測できなかった。標点間で計測した伸びを○△印、肩部間で計測し

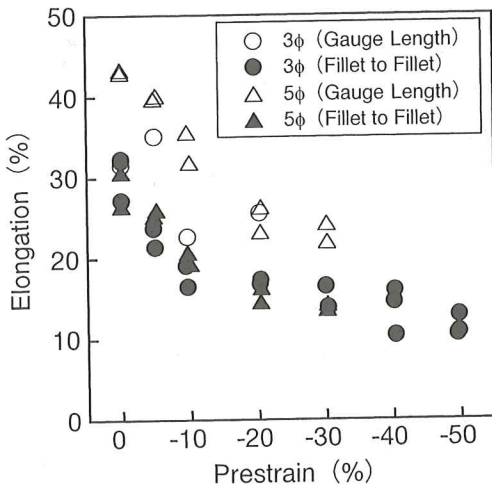


Fig.9 Influence of prestrain on elongation

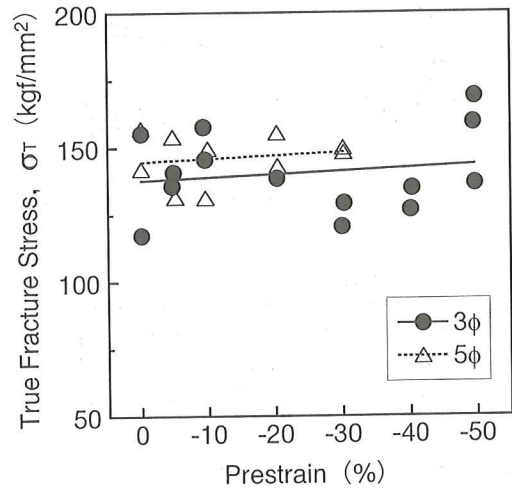


Fig.11 Influence of prestrain on true fracture stress

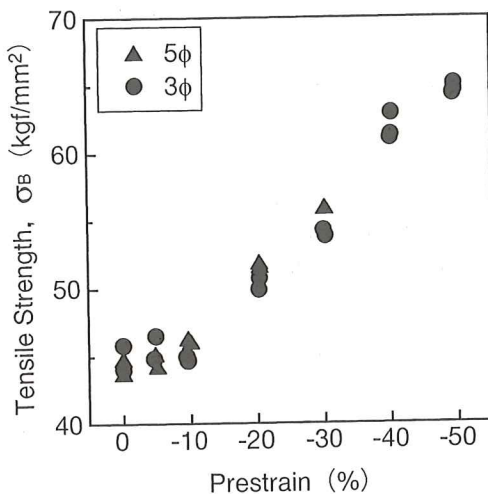


Fig.10 Influence of prestrain on tensile strength

た伸びを●▲印で示した。肩部間で計測した伸び量は、当然ながら評点間で計測した伸び量に比べて小さくなっている。伸びは、予歪量が-20%程度までは急激に減少し、-20%程度を越えると、減少量は次第に一定値に近づいて行くようである。

圧縮予歪量と引張強さとの関係を Fig.10 に示す。予歪量が-10%程度以下では、引張強さはほぼ一定値を示しているが、-10%程度以上になる

と、予歪量の増加と共にほぼ線形に増加している。

予歪量-50%では、母材に比べて伸びが約60%減少し、引張強さが約45%増加している。直径3mm、5mmのいずれの試験片による場合でも、引張強さの方が伸びに比べてばらつきが少なく、試験片形状などに影響され難いことを示している。

圧縮予歪量と真破断応力との関係を Fig.11 に示す。直径3mm、5mm両試験片による結果ともばらついているが、直径3mmの試験片による結果が特にばらつきが大きい。先に述べたように、軸圧縮予歪材作製時に発生したS字変形、樽型変形のため、特に直径3mmの試験片では評点間外側で破断したもの、また45度方向に破断したものが多かった。このため試験結果（真破断応力）には大きなばらつきが生じたものと考えられる。

### 3. 大変形曲げによる亀裂発生試験と有限要素法による大変形曲げ解析

#### 3.1 大変形曲げ亀裂発生試験方法

最も基本的な構造部材として、Fig.12に示す帯板試験片を製作・供試した。供試鋼板は、先に Table 1 に示した SS400 である。試験片平行部は、

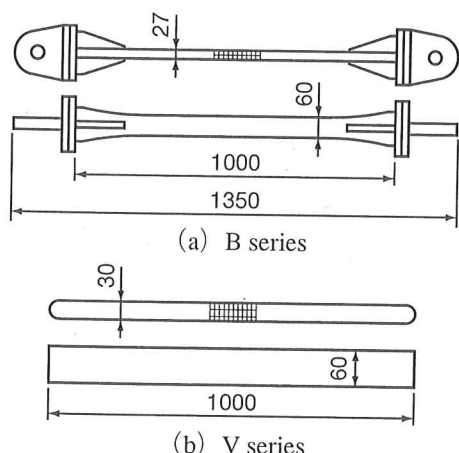


Fig. 12 Shape and size of specimen for crack initiation test by buckling

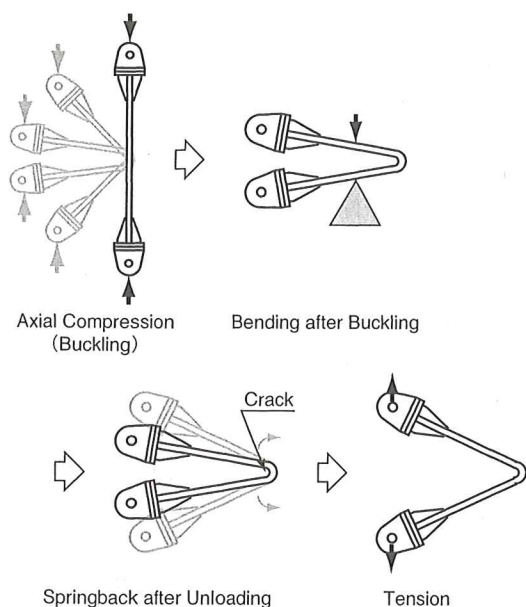


Fig. 13 Loading procedure of crack initiation test by buckling

厚さ27mm, 幅60mmの矩形断面とした。Fig. 12 (a)に示したBシリーズでは, 曲げ変形を与えた後, 引張荷重を与えるための治具および補強用ブラケットを取り付けた。帯板試験片中央部の側面には, 歪計測のため5mm間隔で格子を罫書いた。大変形曲げによる亀裂発生試験には, 200tonf万

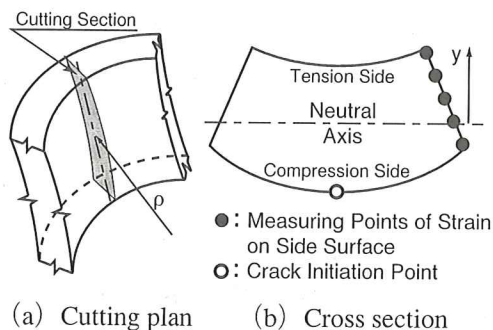


Fig. 14 Location of measuring points of strain

能試験機を用いた。

Bシリーズの試験手順を Fig. 13に示す。まず軸圧縮荷重を加えて座屈させ, その後除荷・再負荷を繰り返しながら段階的に曲げ変形を与えた。さらに, 載荷点を試験片中央部に近づけて, さらに大きな曲げ変形を与えた。各段階での除荷後, 試験片圧縮側表面中央部での亀裂発生の有無を調べるとともに, 側面の罫書線から, 軸方向歪量を計測した。最終除荷後, 各試験片共, 両端をピンを介して引張り, 試験片中央部を開口させた。試験は6体(記号:B1~B6)行ない, 試験片ごとに, 最終除荷時の圧縮側最大歪量を変化させた。

最終除荷後の試験片中央部断面は, Fig. 14(b)に示すように, 圧縮側で凸, 引張側で凹となる。このため試験片圧縮側表面中央部(亀裂発生部)での歪量は, 側面の罫書線より計測した歪量からは推定できない。そこで歪計測を目的として, Fig. 12 (b)に示したVシリーズ試験片(記号:V1~V3)を別途作製し, 供試した。Bシリーズ試験片と同様の手順で所定の曲げ変形を与え, 除荷後中央部を Fig. 14(a)に示したように切断し, 断面形状の計測, 中立軸位置の決定などを行った。

### 3.2 大変形曲げ亀裂発生試験結果

罫書線および断面形状の計測から求めた歪分布の一例を, Fig. 15に示す。また, 歪量の計測位置は Fig. 14(b)の中に示してある。Fig. 15の縦軸は軸方向歪, 横軸は中立軸からの距離を示している。●印は試験片側面の罫書線より計測した歪であり,



破線は断面形状から求めた中立軸位置と、曲率半径( $\rho$ )の計測値より求めた、中立軸位置からの距離( $y$ )と軸方向歪( $\epsilon_x$ )との関係( $\epsilon_x = y/\rho$ )を示したものである。また、○印は、この関係を用いて求めた圧縮側表面中央部（亀裂発生部）の歪である。この計測法によると、試験片圧縮側表面中央部（亀裂発生部）の歪量は、Vシリーズ試験片で-33~-58%であった。また、Bシリーズ試験片は、Vシリーズ試験片と比較した結果、圧縮側表面には、-15~-70%程度の歪が発生していたことが明らかになった。

Table 2 に示すように、記号 B3, B4, V2 試験片では、圧縮荷重除荷後、圧縮側表面で亀裂の発生が確認出来た。その他の試験片では、亀裂の発生は確認出来なかった。記号 B3 試験片では、最終除荷後肉眼で確認できるほどの亀裂が発生していた。その大きさは、長さ約10mm、深さ約1mm程度であった。引張荷重を与えて試験片中央部を開口させたところ、亀裂は長さ約30mm、深さ約5mm程度まで成長した。記号 B4 試験片では、最終除荷後ヘアークラックが確認でき、引張荷重を与えると成長したが、B3 試験片に比べるとかなり小さな亀裂であった。記号 V2 試験片では、最終除荷時に B4 試験片と同程度のヘアークラックが確認できた。一方、記号 B5 試験片では、最終除荷時に亀裂は確認できなかったが、引張荷重を与えて試験片を開口するとヘアークラックが確認できた。記号 B1, B2, B6, V1, V3 試験片では、最終圧縮荷重除荷後も、また引張荷重負荷後にも、亀裂は確認できなかった。

以上の結果より、最終除荷時の圧縮側表面での亀裂発生に対しては、予歪量-40~-55%程度が限界値になっているものと考えられる。

### 3.3 有限要素法による帯板試験片の大変形曲げ解析モデル

前節で述べた帯板試験片の大変形曲げによる亀裂発生試験での、亀裂発生部の歪分布、応力分布を明らかにすることを目的として、ソリッド有限要素を用いた帯板試験片の弾塑性大変形解析を

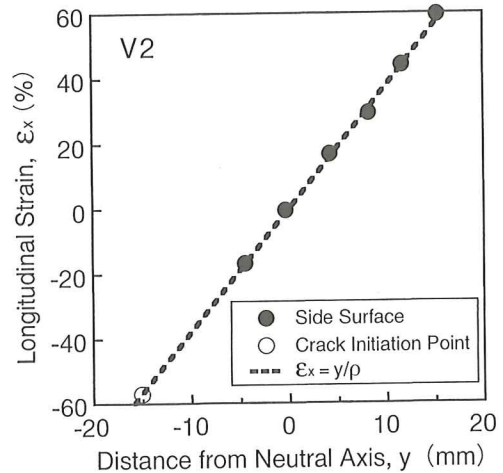


Fig.15 Distribution of longitudinal strain towards thickness direction

Table 2 Results of crack initiation test by bucking

Mark	Side		Center		Crack
	$\epsilon_{Ten.} (%)$	$\epsilon_{Com.} (%)$	$\epsilon_{Ten.} (%)$	$\epsilon_{Com.} (%)$	
B1	17	-3	—	-15	No
B2	34	-15	—	-30	No
B3	73	-15	—	-70	Yes
B4	59	-20	—	-60	Yes
B5	45	-16	—	-35	No (Yes)
B6	50	-17	—	-35	No
V1	43	-18	30	-35	No
V2	60	-17	50	-58	Yes
V3	35	-19	30	-33	No

行った。

解析モデルを Fig. 16 に示す。対称性を考慮して、長さ675mm、幅30mm、板厚27mmの1/4モデルとし、長さ方向に23分割、幅方向に8分割、板厚方向に8分割した。先に Fig. 12 に示したように、Bシリーズ試験片は、一様断面ではなく、また端部にはブラケットや治具などが取り付けられている。しかしながら、これら端部の断面形状が帯板試験片の屈屈崩壊挙動や、亀裂発生部の歪分布や応力分布に及ぼす影響は小さいと考えられることから、端部の形状も平行部と同じであると仮定した。

境界条件を Fig. 17 に示す。載荷は変位制御で

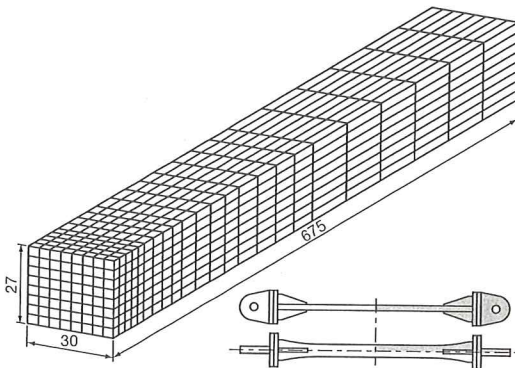


Fig.16 Solid finite element model

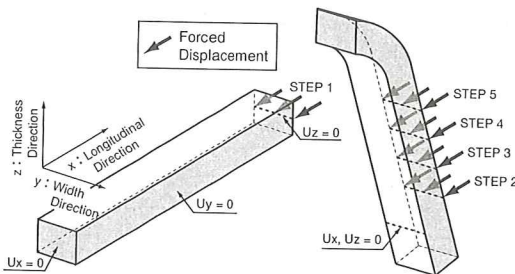


Fig.17 Boundary conditions

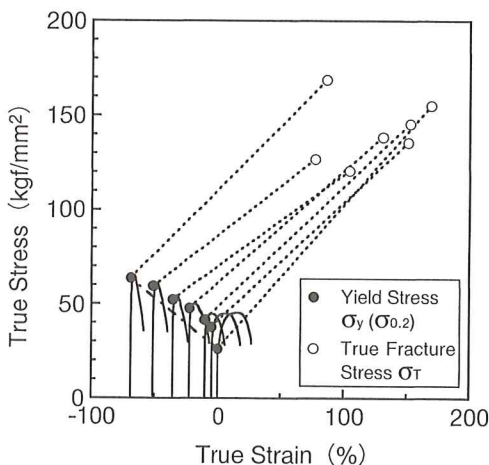


Fig.18 True stress-true strain curves

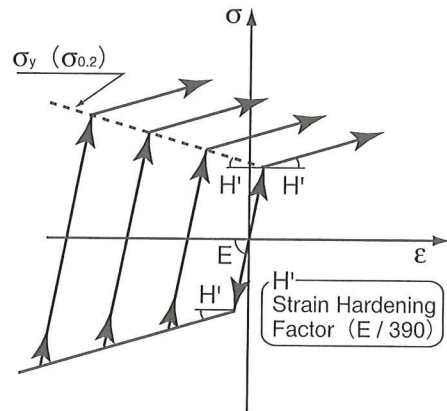


Fig.19 Schematic diagram of linear isotropic strain hardening model

5) ながら強制変位を与えた。初期変形として、載荷点間のスパンで正弦一半波となる撓みを仮定し、その最大値は試験片板厚の1/100とした。

本解析では対象とする歪量が非常に大きいため、歪硬化則や歪硬化係数は次のように決定した。

Fig. 8に示した各応力～歪線図の原点に相当する圧縮予歪量を真歪に換算した結果を、Fig. 18に示す。○印は、破断時の真応力と真歪との関係を、また、●印は降伏応力 (0.2%耐力) をプロットしたものである。破断線は、それぞれの予歪の場合について降伏応力を表す点と、破断点とを結んだものである。一点鎖線は、予歪量 0 % (母材) の降伏応力と、予歪量 -50 % (真歪に換算すると約 -70 %) の降伏応力とを結んだものである。Fig. 18において、一点鎖線の傾きは、いくつかの破断線の傾きと絶対値が大略一致している。このことは、歪硬化によって生じた応力上昇と同程度に降伏応力が上昇することを示している。そこで、Fig. 19に示すように線形等硬化モデルが成立すると仮定した。

以上により、Fig. 18の一点鎖線で示した降伏応力の増加に注目し、歪硬化係数を  $E/390$  とした。降伏は Von Mises の降伏条件に従うものとした。なお、要素には 8 節点六面体ソリッド要素を用い、次数低減積分法を適用した。解析には、汎用コー

行い、前節で述べた試験と同様、座屈変形を与えた後、載荷点を座屈部に近づけ (STEP 2 → STEP



ド FINAS を用いた。

### 3.4 有限要素法による帯板試験片の大変形曲げ解析結果

STEP 2 の除荷終了後の軸方向歪( $\epsilon_x$ )と、除荷前および除荷後の静水圧応力 $[(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3 = \sigma_R]$ の試験片中央断面における板厚方向の分布を、Fig. 20および Fig. 21に示す。Fig. 20および Fig. 21に示した歪および応力は、それぞれ真歪と真応力を表わしている。

応力、歪の評価点は、一要素につき一点、断面全体で64点ある。wを板幅（実際のモデルの1/2、30mm）とすると、板幅中央から  $w/16 \sim 15w/16$  の位置に評価点があることになる。Fig. 20および Fig. 21は、これらの点の $\epsilon_x$ および $\sigma_R$ の板厚方向の分布が分かるようにプロットしたものある。

Fig. 20の歪分布は、板厚方向にほぼ線形な分布となっており、先に Fig. 15に示した試験結果と同様の分布となっている。Fig. 20のSTEP 2の結果を含めて、各STEP（STEP 1～STEP 5）の解析結果を公称歪に換算すると、亀裂発生が観察された試験片圧縮側表面中央部の歪量は、 $-16 \sim -57\%$ 程度となる。

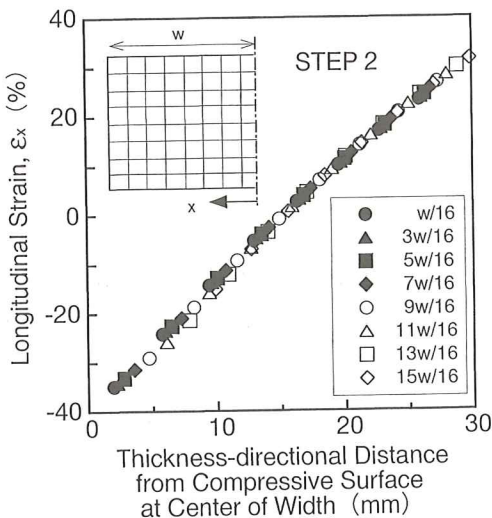
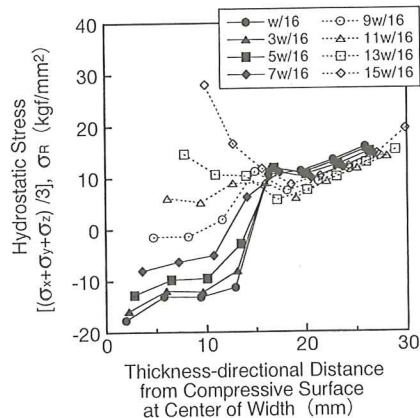


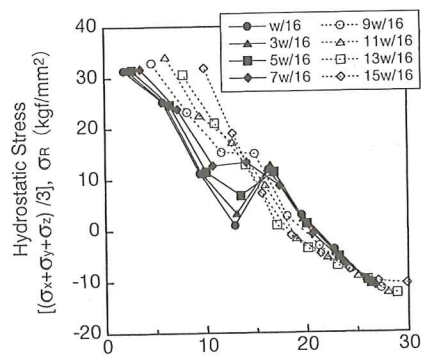
Fig.20 Distribution of longitudinal strain in cross section in thickness direction

一方、Fig. 21の応力分布から、除荷の前後で静水圧応力の分布が異なることが分かる。試験片圧縮側表面中央部 ( $w/16$ ) に注目すると、負荷時（除荷前）には圧縮の応力が作用するが、除荷後は逆に引張の応力が発生している。Fig. 21（STEP 2）では、除荷前には $-18\text{kgf/mm}^2$ 作用しており、除荷後は $31\text{kgf/mm}^2$ 発生している。

以上の結果より、除荷後、亀裂発生部には引張残留応力（引張静水圧応力）が発生していることが明らかになった。解析によれば、その値は、載荷段階が進むにつれて増加することも明らかになった。



(a)Before Unloading



(b)After Unloading

Fig.21 Distribution of hydrostatic stress in cross section in thickness direction

#### 4. 大変形曲げによる亀裂発生現象に関する検討

先に2章で述べた軸圧縮予歪材の引張試験結果から、圧縮予歪の影響で伸びが低下し (Fig. 9参照), 引張強さが増加する (Fig. 10参照) ことが明らかになった。また真破断応力への圧縮予歪の影響は、それほど大きくないことが明らかになった (Fig. 11参照)。予歪量と引張強さおよび予歪量と真破断応力との関係を用いて、大変形曲げによる圧縮側からの亀裂発生現象を検討することにした。

一方、3章で述べたように、帯板試験片による大変形曲げ試験において、試験片圧縮側表面中央部で、除荷時に亀裂が発生する場合があった。亀裂発生には、引張応力の作用が不可欠であるため、除荷時に亀裂発生部に引張応力が作用しているものと推定された。

そこで、有限要素法を適用して応力解析を行った結果、亀裂発生が確認された試験片圧縮側表面中央部には、除荷後大きな引張残留応力が発生することが明らかになった。この引張残留応力が、圧縮予歪によって脆化した部材に亀裂を発生させる基本的要因になっているものと考えた。

以上により、大変形曲げ後の除荷時に、試験片圧縮側表面中央部に発生する引張残留応力 (引張静水圧応力) が、当該部材の真破断応力あるいは引張強さを越えた時に亀裂が発生するものと考えた。Fig. 22は、先に示した Fig. 10および Fig. 11と、有限要素法による解析結果から求めた試験片圧縮側表面中央部の圧縮歪と引張残留応力との関係をプロットしたものである。Fig. 22から明らかなように、解析結果から求めた引張残留応力 ( $\square$ 印) は、圧縮歪の増加とともに二次曲線的に増加している。

また、Fig. 22中の縦軸に平行な一点鎖線と破線は、3章で述べた亀裂発生試験で、亀裂の発生が確認出来た試験片および確認出来なかった試験片の、亀裂発生部の歪量 (Table 2 参照) を表して

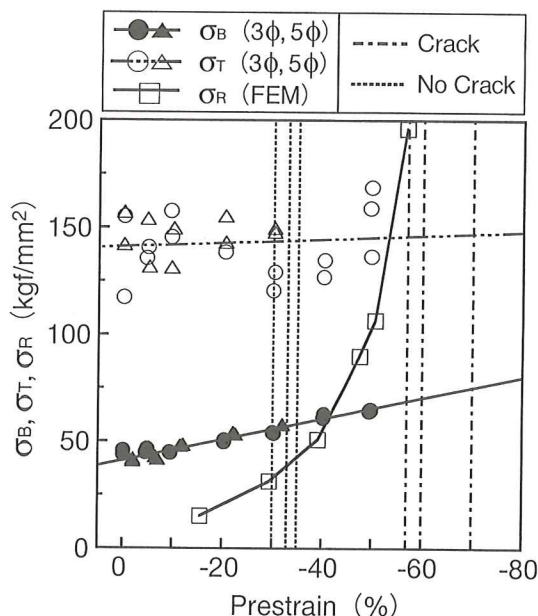


Fig. 22 Relations between  $\sigma_B, \sigma_T, \sigma_R$  and prestrain

いる。

Fig. 22から明らかなように、真破断応力と予歪との関係曲線および引張強さと予歪との関係曲線と、引張残留応力～予歪曲線との交点を境に、圧縮歪が小さい場合には亀裂は発生せず、大きい場合には亀裂が発生していることがわかる。

以上により、軸圧縮予歪材の真破断応力および引張強さと、曲げ変形後の引張残留応力 (引張静水圧応力) とをパラメータとして、大変形曲げによる圧縮歪を受けた部材の亀裂発生を評価することが出来る。

#### 5. 繰り返し大変形曲げによる亀裂発生試験と有限要素法による大変形曲げ解析

##### 5.1 繰り返し大変形曲げ亀裂発生試験方法

供試鋼板として、先に Table 1 に示した SS400 を用いた。

繰り返し大変形曲げによる亀裂発生試験に供試した帯板試験片の形状および寸法を、Fig. 23に示

す。試験片平行部は、厚さ10mm、幅25mmの矩形断面とし、その長さ方向が供試鋼板の圧延方向と一致するように製作した。試験片は、供試鋼板表面より1mm切削した面が圧縮側表面となるように製作した。試験片両端部には、治具を取り付けるために補強用ブラケットを溶接した。表面は三つ山仕上げとし、微小亀裂の観察を容易にするために、試験片長さ方向に研磨した。また、歪計測のために、試験片側面には5mm間隔で格子を罫書き、両表面には試験片中央部に歪ゲージを貼付した。

Fig. 24に試験状況を示す。Fig. 24に示したように、両端単純支持となるような治具に試験片をピンで接続して、試験を実施した。有効試験片長さは、治具接続用のピン間距離（170mm）である。また、表面より1mm切削した面が圧縮側表面となるように、偏心を与えて試験を行なった。試験は、10tonf電気油圧式疲労試験機を用いて、変位制御で実施した。

試験手順は、まず軸力圧縮荷重を与えて座屈させ、目標とする変位量まで圧縮した後、引張荷重を負荷して変形前の状態（ピン間距離170mm）に戻した。以後この過程を繰り返し、座屈部圧縮側および引張側からの亀裂の発生・進展挙動を観察した。

付与した歪量は、初回曲げ圧縮後に側面の格子

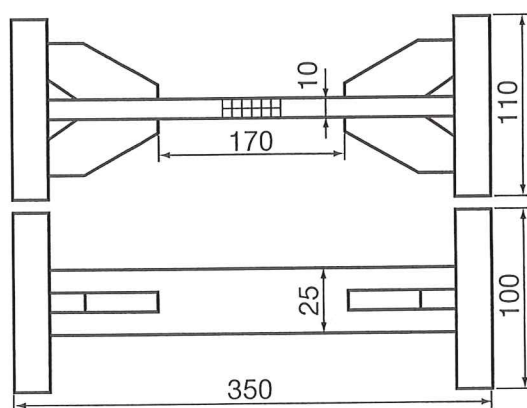


Fig.23 Specimen for crack initiation test under cyclic bending load

間隔を計測し、格子間の変形前と変形後の距離から公称歪を求めた。亀裂の発生・進展観察には、ビデオマイクロスコープ（50倍）を使用し、曲げ圧縮時には引張側の、また引張時には圧縮側の観察を行なった。

Table 3に、各試験片に与えた圧縮変位量を示す。5体（記号：C20～C60）供試し、各試験片ごとに圧縮変位量を20～60mmと変化させた。

## 5.2 繰り返し大変形曲げ亀裂発生試験結果

Fig. 25に変形前（処女材）の試験片表面の状態を、また、Fig. 26に試験片 C30における圧縮側表面での亀裂発生状況を示す。試験片 C30では、繰り返し数20回で無数の微小亀裂が発生し、その後、繰り返し数が進むにつれて微小亀裂は進展し、試験終了時（繰り返し数30回）には3～5mm程度

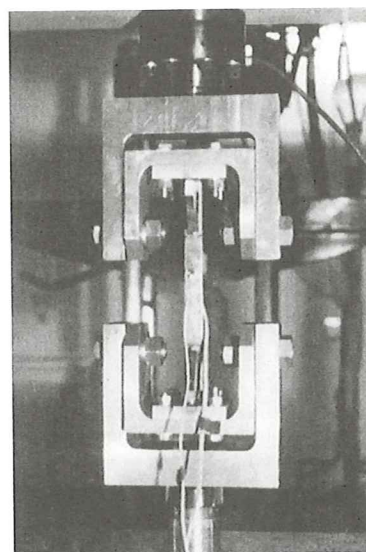


Fig.24 Appearance of crack initiation test under cyclic bending load

Table 3 Compressive displacement amplitude

Mark	C20	C30	C40	C50	C60
Compressive Displacement Amplitude (mm)	20	30	40	50	60



の大きな亀裂に成長した。Fig. 27に、同試験片の引張側表面での亀裂発生・進展状況を示す。引張側表面では、微小亀裂は繰り返し数24回で発生し、圧縮側表面と同様に繰り返し数が進むにつれて大きな亀裂に成長した。他の試験片でも同様に、圧縮側表面および引張側表面において微小亀裂が発

生・成長した。当然のことながら、微小亀裂発生繰り返し数は、圧縮変位量が大きくなると小さく、変位量が小さくなると大きくなった。また、圧縮側表面では試験片幅方向中央部から亀裂が発生したのに対し、引張側表面では試験片側面角部から亀裂が発生した (Fig. 27参照)。さらに、全ての試験片において、微小亀裂は圧縮側表面から先に発生した。

歪量は、試験片両表面に貼付した歪ゲージ、および試験片側面の罫書線によって計測したが、歪ゲージは試験途中ではがれてしまい、試験片幅方向表面中央部 (圧縮側表面亀裂発生部) の歪量は計測できなかった。Fig. 28に、試験片側面の罫書線から求めた、初回曲げ圧縮後の試験片側面における歪計測結果の一例を示す。○、◎印が圧縮側表面の軸方向歪、□、▣印が引張側表面の軸方向歪を表している。圧縮側・引張側とも、5mm 間隔 (○、□) および10mm 間隔 (◎、▣) の格子を

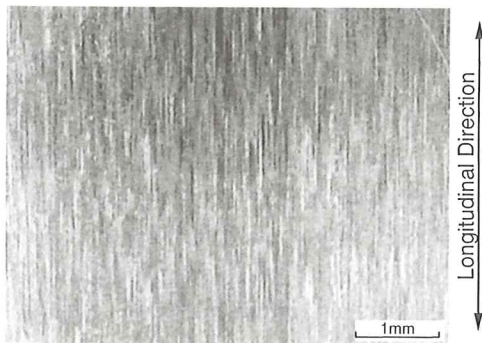
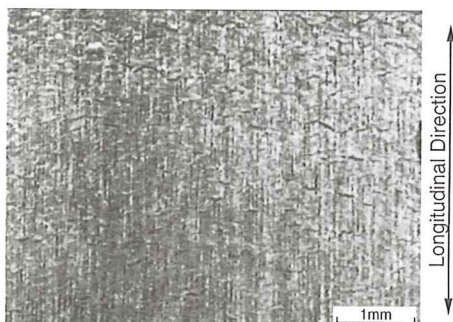
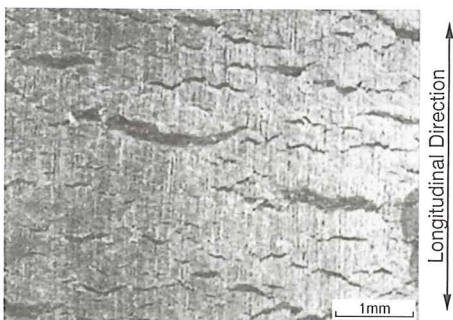


Fig.25 Surface of virgin specimen

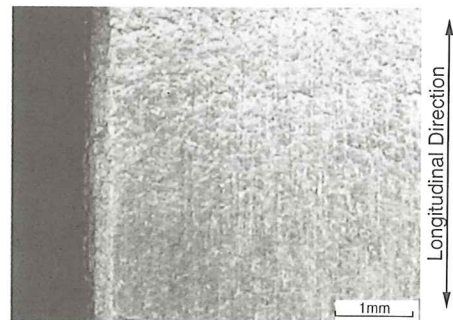


At crack initiation (20 cycles)

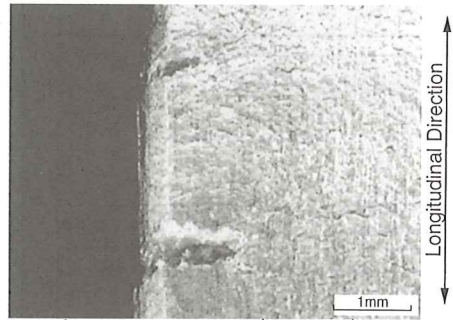


At crack propagation (30 cycles)

Fig.26 Surfaces in compression side of bending specimen at crack initiation and propagation (C 30)



At crack initiation (24 cycles)



At crack propagation (30 cycles)

Fig.27 Surfaces in tension side of bending specimen at crack initiation and propagation (C 30)

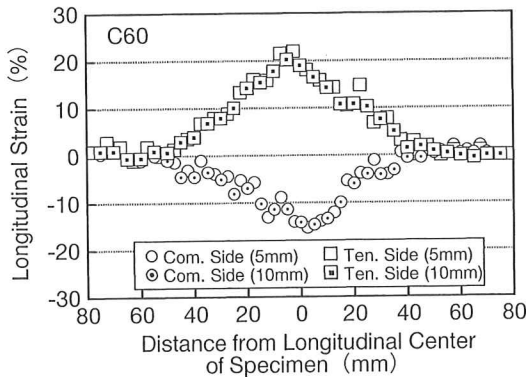


Fig.28 Distribution of longitudinal strain measured by checkered pattern (C 60)

Table 4 Results of crack initiation test under cyclic bending load

Mark	Compressive Displacement Amplitude (mm)	Longitudinal Strain on Side of Specimen (%)		Number of Cycles to Crack Initiation (cycle)	
		Com.	Ten.	Com.	Ten.
C10	20	-9	10	60	70
C20	30	-9	12	35	50
C30	40	-12	14	20	24
C50	50	-12	18	9	—
C60	60	-15	21	11	12

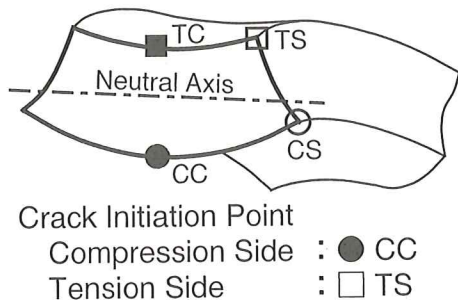


Fig.29 Cross section of specimen after undergoing compressive bending displacement

用いて歪を求めた。Fig.28から明らかなように、試験片中央部において、計測結果は多少ばらついたものとなった。試験片中央部では断面変形が大きかったこと、試験片表面と側面との角部には面

取りが施されていたことなどにより、計測結果にばらつきが生じたものと考えられる。

試験結果を Table 4 に示す。Table 4 に示した圧縮側および引張側の歪量は、試験片長さ方向中央部での 3 点の計測結果の平均値として求めたものである。Table 4 から明らかなように、試験片側面角部において、圧縮側では $-9 \sim -15\%$ 程度、引張側では $10 \sim 21\%$ 程度の歪が発生していた。圧縮側での歪量（ $-9 \sim -15\%$ ）が、引張側の歪量（ $10 \sim 21\%$ ）に比べて、絶対値は小さい値になっている。これは、Fig.29 に示すように、試験片長さ方向中央部では、圧縮側が凸、引張側が凹となるように断面が変形したためである。先に述べたように、圧縮側表面では Fig.29 中 CC 点から、引張側表面では Fig.29 中 TS 点から亀裂が発生した。圧縮側表面亀裂発生部（Fig.29 中 CC 点）では、中立軸からの距離が圧縮側側面角部（Fig.29 中 CS 点）に比べて大きくなるため、側面角部（Fig.29 中 CS 点）で計測された歪量よりも大きな歪量が発生していたものと考えられる。

### 5.3 有限要素法による帯板試験片の繰り返し大変形曲げ解析モデル

前節で述べた繰り返し大変形曲げによる亀裂発生試験の、亀裂発生部の歪分布、応力分布などを明らかにすることを目的として、ソリッド有限要素を用いた弾塑性大変形解析を行なった。

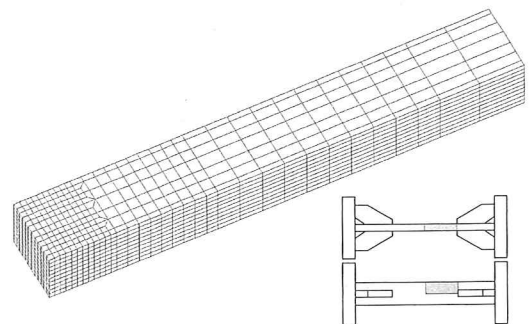


Fig.30 Solid finite element model

解析に用いたモデルを Fig.30 に示す。試験に



用いた治具は、接続用のピン間で両端単純支持の条件となるため (Fig. 24 参照)、試験片中央部 (有効試験片長さ 170 mm) のみを解析対象とした。対称性を考慮して、長さ 85 mm、幅 12.5 mm、厚さ 10 mm の 1/4 モデルとし、対称面には対称境界条件を与えた。解析は変位制御で行ない、前節で述べた試験と同様に、偏心を与えて座屈させた。長さ方向に 33 分割、幅方向に 12 分割、板厚方向に 10 分割し、亀裂発生部である長さ方向中央部の要素は、できるだけ立方体に近い形状とした。供試鋼板の引張試験結果から、歪硬化則は線形等方硬化則とし、歪硬化係数は  $E/390$  とした。降伏は Von Mises の降伏条件に従うものとした。要素には 8 節点六面体ソリッド要素を用い、次数低減積分法を適用した。解析には、汎用コード ABAQUS を用いた。

#### 5.4 有限要素法による帯板試験片の繰返し大変形曲げ解析結果

Fig. 31 に、初回曲げ圧縮時の、圧縮側表面における軸方向歪の、長さ方向の分布の一例を示す。Fig. 31 中には、先に Fig. 28 に示した試験片側面での歪計測結果も示してある。軸方向歪量は、節点間距離の変化から公称歪として求めた。Fig. 31 中の ● 印が圧縮側側面角部 (Fig. 29 中 CS 点) での計測結果、○ 印が圧縮側側面角部 (Fig. 29 中 CS

点に該当する位置) での解析結果、● 印が圧縮側表面中央部 (Fig. 29 中 CC 点に該当する位置) での解析結果を表している。Fig. 31 から明らかなように、圧縮側側面角部での歪量は、有限要素法による解析結果 (○) の方が計測結果 (●) より少し大きい値となっている。これは、試験片角部の面取りを施したため、計測結果は、試験片表面から板厚方向に 1 mm 程度内側の箇所の歪量となっているためであると考えられる。先に述べたように、試験片長さ方向中央部では、圧縮側で凸、引張側で凹となるような断面変形が生じ、中央部に近づくにつれてその断面変形は大きくなっていった。このため、Fig. 31 に示した解析結果のように、試験片長さ方向中央部に近づくにつれて、側面角部での歪量 (○) と幅方向表面中央部での歪量 (●) との差が大きくなっている。

Table 5 に、各試験片に対する有限要素法による解析から得られた、長さ方向中央部における、幅方向表面中央部および側面角部での、圧縮側および引張側の初回曲げ圧縮時の歪量を示す。Table 5 から明らかなように、圧縮側では幅方向表面中央部 (CC 点) での歪量が大きく、引張側では側面角部 (TS 点) での歪量が大きくなっている。亀裂発生部である圧縮側幅方向表面中央部 (CC 点) では  $-16 \sim -26\%$  の、また引張側側面角部 (TS 点) では  $15 \sim 28\%$  程度の歪が発生しており、圧縮側および引張側の亀裂発生部では、絶対値でほぼ同程度の歪が発生していたことが明らかとなった。

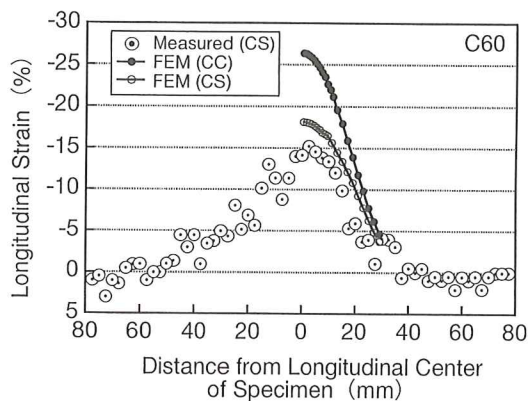


Fig. 31 Longitudinal strain distribution after first bending (C 60)

Table 5 Longitudinal strain after first bending calculated by FEM (%)

Mark	CC	TC	CS	TS
C20	-16	12	-14	15
C30	-19	15	-15	19
C40	-22	17	-17	22
C50	-24	19	-17	25
C60	-26	21	-18	28



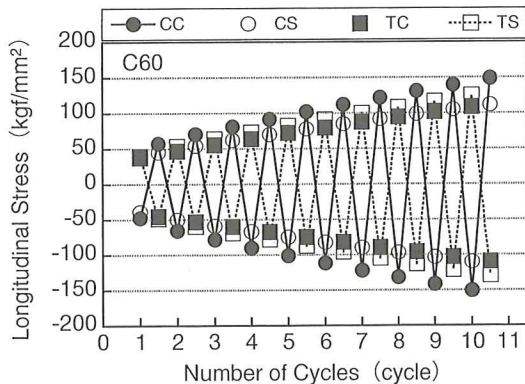


Fig.32 Relations between longitudinal stress and number of cycles (C 60)

Fig. 32に、試験片 C60 に対して、10cycle までの解析を行なったときの、各繰返し段階における、圧縮時および引張時の軸方向応力を示す。●、○印は、試験片圧縮側の幅方向表面中央部（CC 点）および側面角部（CS 点）での軸方向応力を表しており、同様に、■（TC 点）、□（TS 点）印は、試験片引張側表面の軸方向応力を表している（Fig. 29 参照）。また、亀裂発生部となった圧縮側表面幅方向中央部（CC 点：●）および引張側表面側面角部（TS 点：□）のプロットを、実線および点線で結んである。最大圧縮時には圧縮側表面に圧縮応力、引張側表面には引張応力が発生しているが、最大引張時には圧縮側表面には引張応力、引張側表面には圧縮応力が発生している。Fig. 32 から、圧縮側表面幅方向中央部（CC 点：●）の軸方向応力が、他の 3 点の値に比べて大きく、応力振幅も大きいことが分かる。また、引張側表面においては、側面角部（TS 点：□）の応力が、幅方向中央部（TC 点）の値（■）より大きいことが分かる。さらに、他の試験片に対する解析結果においても同様の傾向があった。Fig. 32 の結果は、試験片 C60 に対する解析結果であるが、初回曲げ圧縮時には圧縮側・引張側の各点において、40～50kgf/mm<sup>2</sup>程度の軸方向応力が発生している。その後、繰返し数が進むにつれて、最大圧縮時および最大引張時における各点の軸方向応

力はしだいに大きくなり、10回の繰返し後には、100～150kgf/mm<sup>2</sup>程度になっている。

## 6. 繰返し大変形曲げによる亀裂発生現象に関する検討

先に 5 章で述べた亀裂発生試験結果では、座屈後の繰返し大変形曲げ荷重下において、亀裂は圧縮側では幅方向表面中央部から発生し、引張側では側面角部から発生した。一方、有限要素法による解析結果では、初回曲げ圧縮時の軸方向歪量は、圧縮側では幅方向表面中央部、引張側では側面角部において最大となることが明らかになった。同様に、各繰返し段階での軸方向応力および応力範囲も、圧縮側では幅方向表面中央部、引張側では側面角部において最大になることが明らかになった。このため、圧縮側では幅方向表面中央部から、引張側では側面角部から亀裂が発生したものと考えられる。また、解析結果から、圧縮側幅方向表面中央部と引張側側面角部において、初回曲げ圧縮時の歪量は、絶対値ではほぼ同程度であるにもかかわらず、亀裂発生試験では、圧縮側の亀裂は引張側に比べて早期に発生した。これは、最初に圧縮歪を受けるか、引張歪を受けるかによって、材料の脆化の度合いが異なることや、解析結果から得られた通り、各繰返し段階での軸方向応力および応力範囲が、圧縮側幅方向表面中央部の値は、引張側側面角部の値より大きいことなどによるものと考えられる。

5 章で述べた亀裂発生試験結果から得られた、各試験片での微小亀裂発生繰返し数と、有限要素法解析結果から得られた、亀裂発生部である圧縮側幅方向表面中央部および引張側側面角部の、初回曲げ圧縮時における軸方向歪量（絶対値）との関係を、Fig. 33 に示す。なお、Fig. 33 中には、4 章で報告した初回曲げ圧縮による微小亀裂発生限界歪量も示してある。また、縦軸の歪量および横軸の微小亀裂発生繰返し数とも、対数で表してある。

Fig. 33 から明らかなように、圧縮側および引張

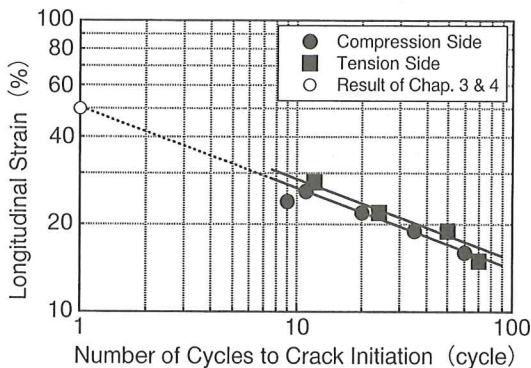


Fig.33 Relations between longitudinal strain and number of cycles to crack initiation

側とも、初回曲げ圧縮時における軸方向歪量と微小亀裂発生繰返し数との間に線形な関係が認められる。

## 7. まとめ

座屈変形後に圧縮側から発生する亀裂を対象に、亀裂発生現象に関して定量的な評価を試みた。さらに、座屈崩壊後、引き続き大きな圧縮および引張りの繰返し荷重を受ける鋼構造部材において発生する亀裂を対象に、亀裂発生現象に関して定量的な評価を試みた。

すなわち、一般船体用軟鋼板と同等の JIS SS400 (板厚29mm) を供試して、軸力圧縮予歪材の引張試験、帯板試験片の大変形曲げによる亀裂発生試験、帯板試験片を用いた繰返し大変形曲げによる亀裂発生試験、および有限要素法による帯板試験片の弾塑性大変形解析を実施し、以下の知見を得た。

- ①軸圧縮予歪材の引張試験結果から、圧縮予歪の影響で伸びは低下し、引張強さは増加するが、真破断応力には、それほど大きな影響はないことが明らかになった。
- ②帯板試験片による大変形曲げ亀裂発生試験において、圧縮側表面中央部での軸方向歪量が40～55%以上になると、除荷後に亀裂が発生することが観察された。

③ソリッド有限要素を用いた帯板試験片の弾塑性大変形解析により、圧縮側表面中央部には、除荷後大きな引張残留応力が発生することが明らかになった。この大きな引張残留応力が、亀裂を発生させる基本的な要因であると考えられる。

④大変形曲げ後の除荷時に、帯板試験片圧縮側表面中央部に発生する引張残留応力（引張静水圧応力）が、当該部材の真破断応力あるいは引張強さを超えた時に亀裂が発生するものと考えられる。

⑤帯板試験片を用いた繰返し大変形曲げ亀裂発生試験から、座屈崩壊後、引き続き大きな圧縮および引張りの繰返し荷重を受けると、亀裂は圧縮側では試験片幅方向表面中央部から、引張側では試験片側面角部から発生し、圧縮側の亀裂は引張側に比べて早期に発生することが明らかになった。

⑥ソリッド有限要素を用いた帯板試験片の弾塑性大変形解析により、圧縮側では試験片幅方向表面中央部、引張側では試験片側面角部において、軸方向歪量および軸方向応力とも最大になることが明らかとなった。また、軸方向応力は、圧縮側幅方向表面中央部での値が最大になることが明らかとなった。

⑦帯板試験片を用いた繰返し大変形曲げ亀裂発生試験から得られた微小亀裂発生繰返し数と、有限要素法による解析結果から得られた亀裂発生部の初回曲げ圧縮時における軸方向歪量との間に、両対数目盛で線形な関係が確認できた。

終わりに臨み、供試鋼板をご提供いただいた川崎製鐵㈱の関係各位に、また、試験片製作にご協力いただいた三菱重工業㈱の関係各位に、厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 寺沢一雄, 大谷碧, 吉田俊夫, 寺井清: 高温予歪が鋼の残留延性におよぼす影響, 造船協会論文集, 第108号 (昭和35年12月), pp. 419 ~ 434.
- 2) 寺沢一雄, 大谷碧, 吉田俊夫, 寺井清: 高温予歪が鋼の切欠靱性におよぼす影響, 造船協会論文集, 第109号 (昭和36年6月), pp. 317 ~ 335.
- 3) 井上肇, 前中浩, 佐久間正明: 圧縮予歪が破壊靱性に及ぼす影響, 日本造船学会論文集, 第160号 (昭和61年12月), pp. 450~460.
- 4) 藤田譲, 野本敏治, 弓削和徳: 圧縮および引張荷重を受ける構造要素の変形挙動 (第1報) —繰返し荷重を受ける柱の変形挙動—, 日本造船学会論文集, 第156号 (昭和59年12月), pp. 346~354.
- 5) 矢島浩: 大型構造物の損傷例とその教訓, 西部造船会会報, 第90号 (平成7年8月), pp. 245 ~ 251.
- 6) 山本元道, 東田幸四郎, 藤久保昌彦, 矢尾哲也, 矢島浩: 座屈により大きな圧縮歪を受けた鋼構造部材の亀裂強度に関する研究 (その1), 日本造船学会論文集, 第178号 (平成7年12月), pp. 565~573.
- 7) 山本元道, 矢島浩, 栗原正好, 守田聡: 座屈により大きな圧縮歪を受けた鋼構造部材の亀裂強度に関する研究 (その2), 日本造船学会論文集, 第182号 (平成9年12月), pp. 659~665.