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5)

正員 山 本 元 道* 正員 矢 島 浩**
正員 松 岡 和 彦*** 町 田 定 信****
学正員 木 坂 有 治*

Crack Initiation Strength of Structural Steel Members Having Experienced Large Compressive Strain due to Buckling Deformation (Fifth Report)

by Motomichi Yamamoto, *Member* Hiroshi Yajima, *Member*
Kazuhiko Matsuoka, *Member* Sadanobu Machida
Yuji Kisaka, *Student Member*

Summary

It is known that compressive plastic strain deteriorates the ductility and fracture toughness of steels. So when buckling collapse takes place in structural steel members under cyclic bending load, cracks may easily initiate and propagate at the concave side (compressive side) of buckling deflection.

In this paper, an attempt was made to quantify the crack initiation strength of welded structural steel members subjected to cyclic bending load after undergoing buckling collapse. For this purpose, crack initiation tests using fillet welded specimens under cyclic bending load were performed with JIS SM 490 C steel plate. In these tests, specimens were given various initial compressive displacement amplitude and cyclic displacement amplitude after undergoing buckling, and number of cycles to fracture were examined. Elastoplastic large deformation FEM analyses based on the combined hardening law were also performed for all loading cases to investigate stress and strain at crack initiation sites.

As results of investigations described above, the following conclusions were obtained.

- (1) According to the crack initiation test, cracks initiated at the fillet weld toe on the center of width of the compressive side. And cracks propagated along the fillet weld toe toward the width direction.
- (2) Relationships between longitudinal strain range of crack initiation site at first cycle and number of cycles to fracture can be expressed by linear functions on semilogarithmic scale.
- (4) New equations has been developed in order to predict the fracture strength of the welded structural steel member under cyclic bending load after undergoing buckling collapse.

1. 結 言

大型船舶をはじめとする大型溶接鋼構造物に過大な荷重が作用した場合、その構成部材が座屈崩壊する場合がある。ま

た、大型溶接鋼構造物に大量に使用されている JIS 一般構造用圧延鋼材あるいは JIS 溶接構造用圧延鋼材では、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いる^{1)~5)}。したがって、座屈崩壊した部材の座屈撓みの内側（圧縮側）には大きな圧縮の塑性歪が発生し、材質が劣化・脆化する。引き続き変動荷重が付加されると、座屈撓みの内側（圧縮側）から亀裂が容易に発生・進展して^{6)~10)}、座屈崩壊した部材が破断してしまい、局部構造部材の座屈崩壊が大破壊事故への引き金になることが実際の損傷例で確認されている¹¹⁾。

前報¹²⁾では、JIS SM 490 C を供試して、帯板状の平滑試験片を用いた繰返し曲げ荷重下での亀裂発生試験、ならびに有限要素法による 3 次元弾塑性大変形解析を実施し、座屈崩

* 広島大学 大学院 工学研究科

** 長崎総合科学大学 工学部

*** (株) 新来島どっく

**** 川崎重工業 (株)

(研究当時 広島大学 大学院 工学研究科)

壊後、引き続き種々の大きさの繰り返し変位を受ける帯板平滑部材の亀裂発生現象に関して、定量的な調査・検討を行った。その結果、亀裂発生部の1サイクル目の歪範囲を用いて、亀裂発生・破断強度を概略推定出来ることが明らかになった。

本報は、座屈崩壊後、引き続き種々の大きさの繰り返し変位を受ける溶接鋼構造部材の亀裂強度に関して、調査・検討した結果について報告するものである。すなわち、

- ① スチフナ隅肉溶接試験片を用いた座屈崩壊後の繰り返し曲げ荷重下での亀裂発生試験により、座屈崩壊時に種々の大きさの曲げ変形を受けた後、引き続き種々の大きさの繰り返し変位を受ける場合の、スチフナ隅肉溶接止端部からの亀裂発生現象ならびに破断繰り返し回数を把握した。
- ② 複合硬化則を用いた、有限要素法による3次元弾塑性大変形FEM解析を実施し、亀裂発生部であるスチフナ隅肉溶接止端部に生じる歪・応力を詳細に把握した。

上記①および②、ならびに前報¹²⁾で報告した平滑試験片に対する検討結果から、座屈崩壊後、引き続き種々の繰り返し変位を受ける溶接鋼構造部材の亀裂発生現象に関しての定量的な評価を試みた。

2. 繰り返し曲げ荷重下での亀裂発生試験とその結果

2.1 供試鋼板および試験方法

供試鋼板は、前報¹²⁾で報告した繰り返し曲げ荷重下での亀裂発生試験に供試した鋼板と同一材（板厚35mmのJIS溶接構造用圧延鋼材SM 490 C）とした。ミルシートによる化学成

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of tested steel plate (JIS SM 490 C)

Chemical Composition (mass%)						Mechanical Properties			
C	Si	Mn	P	S	Ceq. (WES)	Y.P. (N/mm ²)	T.S. (N/mm ²)	Y.R. (%)	El. (%)
0.117	0.26	1.32	0.018	0.003	0.358	431	529	81.5	27.0

Fig.1 Specimen for crack initiation test under cyclic bending load

Photo 1 Appearance of crack initiation test under cyclic bending load

分と機械的性質を Table 1 に示す。

繰り返し曲げ荷重下での亀裂発生試験に供試したスチフナ隅肉溶接試験片の形状および寸法を、Fig.1 に示す。前報¹²⁾で報告した、厚さ8mm、幅50mmの矩形断面を有する平滑試験片と全く同じ形状・寸法の試験片長さ方向中央部に、厚さ7mm、幅20mmのスチフナを試験片幅方向に隅肉溶接して製作した。スチフナは、供試鋼板黒皮表面より1mm切削した面に溶接し、スチフナを溶接した面が座屈撓みの内側（圧縮側）表面となるように供試した。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。また、歪計測のために、試験片側面に5mm間隔で格子を罫書き、試験片両表面幅方向中央部には、試験片長さ方向中央部から10、20、30、40mmの位置に歪ゲージを貼付した。

Photo 1 に試験状況を示す。Photo 1 に示したように、接続用のピン間で両端単純支持となるような治具に試験片を取り付けて試験を実施した。試験片は、両端部に溶接した補強用ブラケットの終端部が、接続用ピンの中心位置と一致するように製作した。この時の有効試験片長さは、接続用ピンの初期間隔（試験片両端部に溶接した補強用ブラケットの終端部間隔、Fig.1 参照）210mmである。また、スチフナを溶接した面（供試鋼板黒皮表面より1mm切削した面）が座屈撓みの内側（圧縮側）表面となるように、若干偏心を与えて試験を行った。試験は100kN電気油圧式疲労試験機を用いて、変位制御で行なった。なお、変位速度は2cm/min.とした。

Table 2 に、各試験片に付与した初期圧縮変位量および繰り返し変位量を示す。初期圧縮変位量と繰り返し変位量とが同じものを3体（W-20-20、W-30-30、W-50-50）供試し、初期圧縮変位量と繰り返し変位量とが異なるものを2体（W-50-20、W-50-30）供試した。

Fig.2 に、1サイクル目の荷重～変位曲線の計測結果の一例

Table 2 Initial compressive displacement amplitude and cyclic displacement amplitude

Specimen Mark	Initial Compressive Displacement Amplitude (mm)	Cyclic Displacement Amplitude (mm)
W-20-20	20	20
W-30-30	30	30
W-50-20	50	20
W-50-30		30
W-50-50		50

Fig.2 Load - displacement relationship on first cycle of crack initiation test

を示す。試験手順は、まず試験片に軸力圧縮荷重を与えて座屈させ (Fig.2 中①)、目標とする初期圧縮変位量まで圧縮した後 (Fig.2 中②)、引き続き種々の大きさの繰り返し変位を付与し (Fig.2 中④)、スチフナ隅肉溶接止端部からの亀裂の発生・進展挙動を観察した。

付与した歪は、1サイクル目において、目標とする初期圧縮変位量まで曲げ圧縮変形を与えた後に除荷し (Fig.2 中③)、曲がっている試験片を試験機から取り外した後に、読み取り顕微鏡 (10 倍) を用いて試験片側面の格子間隔を計測し、変形前と変形後の格子間隔から公称歪として求めた。また、試験片両表面に貼付した歪ゲージにより、各サイクルでの歪量を計測した。

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、各サイクルの最大引張時にスチフナ隅肉溶接止端部全周の観察を行なった。

2.2 試験結果

試験片 W-50-30 での亀裂の発生・進展状況を Photo 2 に、破断面の状況を Photo 3 に示す。Photo 2 から明らかなように、亀裂はスチフナ隅肉溶接止端部 (圧縮側表面) の試験片幅方向中央部から、溶接止端部に沿って発生した。その後、繰り返し回数が進むにつれて、亀裂は溶接止端部に沿って試験片幅方向へ進展した。また Photo 3 から明らかなように、引張側表面からも亀裂が若干発生してはいるが、圧縮側表面幅方向中

(a) 50 cycles

(b) 70 cycles

Photo 2 Crack initiation and propagation at fillet weld toe (W-50-30)

Tensile Side

Compressive (Fillet Welded) Side 5mm

Tensile Side

Photo 3 Fracture surfaces (W-50-30, 84 cycles)

Table 3 Results of crack initiation test under cyclic bending load (Number of cycles to fracture)

Specimen Mark	Initial Compressive Displacement Amplitude (mm)	Cyclic Displacement Amplitude (mm)	Number of Cycles to Fracture (cycles)
W-20-20	20	20	71
W-30-30	30	30	41
W-50-20	50	20	381
W-50-30		30	84
W-50-50		50	19
F-30-30	30	30	139
F-50-20	50	20	946
F-50-30		30	350
F-50-50		50	46
F-70-70	70	70	28
F-90-20	90	20	1440
F-90-70		70	51
F-90-90		90	16

Fig.3 Relations between initial compressive displacement amplitude and number of cycles to fracture

中央の隅肉溶接止端部から発生した亀裂が、大きく進展して試験片を破断に至らした。

亀裂発生試験から得られた破断繰返し回数を、Table 3に示す。また、各試験片に付与した初期圧縮変位量と破断繰返し回数との関係をFig.3に示す。Fig.3中の縦軸および横軸はともに対数で表わしている。なお、Table 3およびFig.3中には、前報¹²⁾で報告した平滑試験片の結果も示している。

Fig.3から明らかなように、初期圧縮変位量と同じ繰返し変位量を付与したスチフナ隅肉溶接試験片(W-50-50, W-30-30, W-20-20)の結果を見ると、平滑試験片の場合と同様、初期圧縮変位量と破断繰返し回数との間に線形な関係が認められる。また、スチフナ隅肉溶接試験片の破断繰返し回数は、同じ初期圧縮変位量および繰返し変位量を付与した平滑試験片の破断繰返し回数に比べて、約1/2～1/3程度と大きく低下している。

3. 有限要素法による解析とその結果

3.1 解析モデルおよび解析条件

2章で述べた繰返し曲げ荷重下での亀裂発生試験における、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に、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。

解析に用いたモデルをFig.4に示す。Photo 1に示したように、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、試験片中央部(有効試験片長さ:210mm, Fig.1参照)のみを解析対象とし、対称性を考慮して1/4モデルとした。亀裂発生部である圧縮側表面幅方向中央部のスチフナ隅肉溶接止端部近傍の要素は、長さ0.5mmの立方体とした。解析には8節点6面体ソリッド要素を用い、次数低減積分法を適用した。降伏はVon Misesの降伏条件に従うものとし、解析は変位制御で行ない、2章で述べた試験と同様に、偏心を与えて座屈させた。解析には汎用コードFINASを用いた。

歪硬化則および歪硬化係数は、前報¹²⁾で報告した平滑試験片に対する解析の場合と同様に、供試鋼板の軸力圧縮予歪材引張試験結果⁹⁾を基に決定した。すなわち、歪硬化則としては、移動硬化と等方硬化両方の影響を考慮できる複合硬化則を用いた。また、軸力圧縮予歪材の引張試験結果から得られた応力～歪関係をうまく再現できるように、真塑性歪量1%ごとに、等方硬化と移動硬化それぞれの歪硬化係数を導出した。

3.2 解析結果

Fig.5に、初回最大圧縮時の、圧縮側表面における軸方向歪の、長さ方向分布の一例を示す。Fig.5は、初期圧縮変位量30mmを与えた試験片W-30-30の解析結果および計測結果を表わしている。Fig.5中の◇印は、試験片側面に罫書いた格子間隔の変化から求めた、圧縮側表面と側面との角部での計測結果、○印は圧縮側表面と側面との角部での解析結果、●印は圧縮側表面幅方向中央部での解析結果を表わしている。また、△印は、試験片長さ方向中央部から40mm離れた位置の、圧縮側表面幅方向中央部に貼付した歪ゲージによる計測結果を表わしている。なお、解析結果の軸方向歪は、節点間距離の変化から公称歪として求めた。

圧縮側表面と側面との角部での解析結果(○)と計測結果(◇)とを比較すると、計測結果に多少ばらつきがあるものの、試験片長さ方向の歪分布状況などは良く対応している。また、解析結果は、歪ゲージによる計測結果(△)とも良く

Fig.4 Solid finite element model

Fig.5 Longitudinal strain distributions on compressive surface after first compression

Fig.6 Longitudinal strain distributions on compressive surface after first compression and first tension

Fig.7 Longitudinal strain distributions on compressive surface after first compression and first tension

対応している。

Fig.6に、初期圧縮変位量と同じ繰り返し変位量を付与した場合（W-20-20、W-30-30、W-50-50）の、1サイクル目の最大圧縮時ならびに最大引張時の、圧縮側表面幅方向中央部での軸方向歪分布を示す。Fig.6中左側が最大圧縮時の歪分布を、右側が最大引張時の歪分布を表わしている。同様に、初期圧縮変位量を一定（50mm）とし、繰り返し変位量を変化させた場合（W-50-20、W-50-30、W-50-50）の結果を、Fig.7に示す。

Fig.6およびFig.7から明らかなように、全てのケースにおいて、亀裂発生部であるスチフナ隅肉溶接止端部（試験片長さ方向中央部から9.5mmの位置）から少し離れた位置での軸方向歪の絶対値が最も大きくなっている。Fig.6を見ると、初期圧縮変位量と繰り返し変位量とが同じ場合には、付与する変位量が大きくなるにつれて、最大圧縮時の溶接止端部近傍での軸方向歪の絶対値が大きくなっている。一方、Fig.7を見ると、初期圧縮変位量が同じ場合、付与する繰り返し変位量が大きくなるにつれて、最大引張時の溶接止端部での軸方向歪の値が大きくなっている。

Table 4に、解析結果から得られた、亀裂発生部である試験片幅方向中央部のスチフナ隅肉溶接止端部での、1サイクル目の軸方向歪範囲、ならびに最大圧縮時および最大引張時の軸方向応力を示す。Table 4中には、亀裂発生試験結果から得

Table 4 Results of FEM analysis and crack initiation tests

Specimen Mark	Longitudinal Strain Range (%)	Longitudinal Stress (MPa)		Number of Cycles to Fracture (cycles)
		1st Com.	1st Ten.	
W-50-50	10.8	1630	1530	19
W-30-30	8.0	1430	1052	41
W-20-20	6.5	1304	969	71
W-50-30	6.0	1630	731	84
W-50-20	4.4	1630	539	381
F-90-90	14.1	1094	1211	16
F-70-70	12.5	995	1191	28
F-50-50	10.9	752	1188	46
F-90-70	10.7	1094	1156	51
F-30-30	8.6	633	629	139
F-50-30	4.9	752	563	350
F-50-20	2.4	752	545	946
F-90-20	1.5	1094	567	1440

られた破断繰り返し回数、ならびに平滑試験片に対する結果も示している。なお、Table 4中に示した歪範囲および応力は、スチフナ隅肉溶接試験片の場合、亀裂発生部である試験片幅方向中央部の溶接止端部に最も近い要素の値を、平滑試験片の場合、亀裂発生部である試験片長さ・幅方向中央部圧縮側表面の要素の値を示している。

Table 4から明らかなように、スチフナ隅肉溶接試験片ならびに平滑試験片ともに、1サイクル目の歪範囲が大きくなるにつれて破断繰り返し回数が少なくなっている。また、スチフナ隅肉溶接試験片および平滑試験片ともに、初期圧縮変位量に対する繰り返し変位量の割合が大きくなるにつれて、亀裂発生部に生じる最大引張時の応力が、非常に大きくなっていることが分かる。

初期圧縮変位量と繰り返し変位量とが同じ場合のスチフナ隅肉溶接試験片（W-30-30、W-50-50）と平滑試験片（F-30-30、F-50-50）とを比べると、スチフナ隅肉溶接試験片の破断繰り返し回数は、平滑試験片の破断繰り返し回数の1/2～1/3程度と大きく低下している。さらに、亀裂発生部の歪範囲はほぼ同程度であるが、最大圧縮時ならびに最大引張時の応力の値は、スチフナ隅肉溶接試験片の方が非常に大きくなっている。

同様に、初期圧縮変位量と繰り返し変位量とが異なる場合のスチフナ隅肉溶接試験片（W-50-20、W-50-30）と平滑試験片（F-50-20、F-50-30）とを比べると、スチフナ隅肉溶接試験片の破断繰り返し回数は、平滑試験片の破断繰り返し回数の1/3～1/4程度と大きく低下している。さらに、亀裂発生部の歪範囲および最大圧縮時ならびに最大引張時の応力の値とともに、スチフナ隅肉溶接試験片の方が非常に大きくなっている。

4. 微小亀裂発生・破断強度に関する検討

先に2章で述べた座屈崩壊後の繰り返し曲げ荷重下での亀裂発生試験結果において、亀裂は、試験片幅方向中央部のス

チフナ隅肉溶接止端部（圧縮側表面）から発生し、繰り返し回数が進むにつれて溶接止端部に沿って試験片幅方向へ進展し、試験片を破断に至らしめた。さらに、先に3章で述べた解析結果から、亀裂発生部の1サイクル目の軸方向歪範囲が大きくなるにつれて、破断繰り返し回数が少なくなることが明らかになった。また、前報¹²⁾で報告した平滑試験片に対する検討結果から、亀裂発生部の1サイクル目の軸方向歪範囲を用いることにより、繰り返し大変形曲げ荷重下での微小亀裂発生および破断強度を推定できる目処を得た。そこで、亀裂発生部である試験片幅方向中央部スチフナ隅肉溶接止端部の1サイクル目の軸方向歪範囲を用いて、破断強度を検討することにした。

Fig.8に、有限要素法解析結果から得られた亀裂発生部である試験片幅方向中央部スチフナ隅肉溶接止端部での、1サイクル目の軸方向歪範囲と、亀裂発生試験結果から得られた破断繰り返し回数との関係を示す。Fig.8中の縦軸は標準目盛、横軸は対数目盛で表わしている。また、Fig.8中には、前報¹²⁾で報告した平滑試験片に対する結果も示している。

Fig.8から明らかなように、スチフナ隅肉溶接試験片ならびに平滑試験片ともに、亀裂発生部の1サイクル目の軸方向歪範囲と破断繰り返し回数との間に、片対数目盛で線形な関係が認められる。そこで、以下に示す推定式を、最小自乗法により導出した。

$$\Delta \epsilon_{\text{first}} = \begin{cases} -7.40 \cdot \log(N_f) + 20.2 & (\text{Fillet weld toe}) \\ -6.58 \cdot \log(N_f) + 22.1 & (\text{Smooth}) \end{cases} \quad (1)$$

ただし $\Delta \epsilon_{\text{first}}$: 亀裂発生部の1サイクル目の歪範囲 (%)
 N_f : 破断繰り返し回数 (回)

Fig.8中には、(1)式により推定した破断強度線も示している。Fig.8から明らかなように、(1)式による推定線は、試験結果を精度良く表現している。

Fig.8から明らかなように、スチフナ隅肉溶接試験片W-30-30およびW-50-50は、同じ変位量を付与した平滑試験片F-30-30およびF-50-50に比べて、1サイクル目の亀裂発生部の歪範囲

Fig.8 Relations between longitudinal strain range of crack initiation site at first cycle and number of cycles to fracture

围がほぼ同程度であるにもかかわらず、早期に破断した。これは、Table 4に示したように、亀裂の開口に大きく影響すると考えられる最大引張時の亀裂発生部の応力が、平滑試験片に比べて非常に大きかったためであると考えられる。

一方、平滑試験片F90-70とF-50-50とを比べると、初期圧縮変位量ならびに繰り返し変位量が異なるにも関わらず、同程度の繰り返し回数で破断した。これは、Table 4に示したように、亀裂発生部の1サイクル目の歪範囲がほぼ同じであるだけでなく、最大引張時の応力もほぼ同じであったためであると考えられる。さらに、スチフナ隅肉溶接試験片W-50-20と平滑試験片F-50-30とを比べると、試験片形状および繰り返し変位量が異なるにも関わらず、ほぼ同程度の繰り返し回数で破断した。Table 4を見ると、両試験片の亀裂発生部の1サイクル目の歪範囲ならびに最大引張時の応力ともに、ほぼ同程度である。すなわち、亀裂発生部の1サイクル目の軸方向歪範囲および最大引張時の応力が同程度であれば、試験片形状や繰り返し変位量によらず、破断強度を統一的に評価出来るものと考えられる。

本評価手法を用いることにより、座屈崩壊後、種々の圧縮変位および繰り返し変位を受ける溶接鋼構造部材の亀裂強度が概略可能になるものと考えられる。

5. ま と め

座屈崩壊後、引き続き大きな繰り返し変位を受ける溶接鋼構造部材の亀裂強度に関して、定量的な評価を試みた。すなわち、JIS SM 490 Cを供試して、スチフナ隅肉溶接試験片を用いた繰り返し曲げ荷重下での亀裂発生試験、および有限要素法による弾塑性大変形解析を実施し、以下の知見を得た。

- ①スチフナ隅肉溶接試験片を用いた、繰り返し曲げ荷重下での亀裂発生試験結果から、座屈崩壊後、引き続き種々の繰り返し変位を受けると、亀裂は試験片圧縮側表面幅方向中央部のスチフナ隅肉溶接止端部から発生し、溶接止端部に沿って試験片幅方向へと進展することが明らかになった。
- ②有限要素法による解析結果から得られた亀裂発生部の1サイクル目の歪範囲と、亀裂発生試験結果から得られた破断繰り返し回数との間に、片対数目盛で線形な関係が確認できた。
- ③1サイクル目の歪範囲および最大引張時の応力が同じであれば、付与する変位量および試験片形状によらず、同程度で破断することが明らかになった。
- ④座屈崩壊後、引き続き種々の大きな繰り返し曲げ変形を受ける溶接鋼構造部材のスチフナ隅肉溶接止端部からの亀裂発生強度を推定出来る式を導出した。

このように、座屈崩壊後、引き続き種々の繰り返し変位を受ける溶接鋼構造部材の、亀裂強度を定量的に把握・評価出来る目処を得た。今後、材質・板厚（部材寸法）などが亀裂強度に及ぼす影響についての検討を行なう所存である。

謝 辞

供試鋼板をご提供いただいた日本鋼管（株）総合材料技術研究所 栗原正好 主幹に、また、試験片製作にご協力いただいた三菱重工業（株）の関係各位に、厚くお礼申し上げます。

なお、本研究は、（財）川鉄 21 世紀財団の補助を受けていることを付記し、関係各位に謝意を表します。

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) 山本元道，矢島浩，栗原正好，榎本竜司，町田定信：大きな圧縮予歪を受けた鋼構造部材の強度・切欠靱性，西部造船会会報，第 100 号（平成 12 年 8 月），pp.327 ~ 334.
- 5) 山本元道，矢島浩，栗原正好，榎本竜司，町田定信：大きな圧縮予歪を受けた鋼材の破壊靱性に関する一考察，西部造船会会報，第 102 号（平成 13 年 8 月），pp.265 ~ 272.
- 6) 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.
- 7) 吉成仁志，榎並啓太郎，今井拓水，小関正，島貫広志，井上健裕，栗飯原周二：圧縮予歪を受けた鋼材からの延性き裂発生挙動，日本造船学会論文集，第 188 号（平成 12 年 12 月），pp.691 ~ 705.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 山本元道，栗原正好，東田幸四郎，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 3），日本造船学会論文集，第 185 号（平成 11 年 6 月），pp.241 ~ 248.
- 11) 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.
- 12) 山本元道，矢島浩，高允宝，佐藤進，町田定信：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 4），日本造船学会論文集，第 189 号（平成 13 年 6 月），pp.387 ~ 394.