

広大科研

19

16206085

0100453464

---

船体の逐次崩壊挙動とその効率的解析法に関する研究

---

研究課題番号 16206085

平成16年度～平成18年度科学研究費補助金

(基盤研究(A))研究成果報告書

平成19年5月

研究代表者 藤久保 昌彦

広島大学大学院工学研究科教授

広島大学図書

0100453464



## 目次

はしがき	2
研究組織	4
交付決定額	4
研究発表	4
研究成果による工業所有権の出願・取得状況	5
研究成果の概要	
(1) 面内圧縮と水圧荷重を考慮できる ISUM 板要素の開発	6
(2) ISUM による船体の縦曲げ逐次崩壊解析システムの開発	6
(3) 有孔パネルの応答を表す ISUM 要素の開発	6
(4) ISUM によるダブルハル構造の逐次崩壊解析システムの開発	7
(5) パネルの準静的崩壊解析への動的陽解法の適用性に関する研究	7
(6) ボックスバーダーモデルの縦曲げ崩壊試験と ISUM 解析	7

## 研究成果

研究論文[1] : Development of ISUM Plate Element with Consideration of Lateral Pressure Effects and Its Application to Stiffened Plates of Ships

研究論文[2] : Application of Idealized Structural Unit Method to Progressive Collapse Analysis of Ship's Hull Girder under Longitudinal Bending

研究論文[3] : Development of ISUM Plate Element Considering Lateral Pressure Effects and Its Application to Stiffened Plates

研究論文[4] : 理想化構造要素法による船体の縦曲げ逐次崩壊解析

研究論文[5] : 有孔パネルの応答を表す ISUM 要素の開発について

研究論文[6] : パネルの準静的崩壊解析への動的陽解法の適用性について

研究論文[7] : 有孔パネルの応答を表す ISUM 要素の開発—短辺方向荷重を受ける場合の崩壊挙動の再現—

研究論文[8] : Development of ISUM Element for rectangular Plate with Cutout

研究論文[9] : 桁構造の崩壊挙動を再現する ISUM 要素の開発と二重底構造の崩壊解析



への適用

資料1： 動的陽解法による準静的崩壊シミュレーションにおける荷重速度条件について

資料2： ボックスガーダー試験体の縦曲げ崩壊試験と ISUM 解析

## は し が き

船体構造の最も基本的な強度は、船体を一本の箱形梁と見なしたときの縦曲げ強度である。大開口を有する船体では、捩り強度の評価も重要となる。このような船体の全体最終強度を評価するためには、板および防撓パネルが逐次的に座屈・塑性崩壊しながら全体崩壊に至る挙動を明らかにする必要がある。船体横断面の縦曲げ逐次崩壊挙動の解析に広く使用される Smith の方法では、断面を構成する防撓板要素の平均軸応力～平均軸ひずみ関係を予め求めておき、これを断面平面保持の仮定の下に積分して曲げモーメント～曲率関係が求められる。しかしこの方法では、縦強度に対するホールド変形の影響など、3次元構造体としての崩壊挙動を正確に追跡できない。

ところで近年、非線形有限要素解析技術と計算機能力の発達によって、数百万自由度の大規模非線形解析も可能になってきた。船体の逐次崩壊挙動を正確に把握し、より合理的な最終強度評価を可能にするためには、有限要素法による直接解析が有効である。しかしながら、現実の設計でこのような大規模解析を行うことは不可能であり、有限要素法よりも格段に高速な逐次崩壊解析法が望まれる。このような方法に、理想化構造要素法 (Idealized Structural Unit Method, ISUM) がある。ISUM によれば、通常有限要素法に比べて大きな構造単位を一要素として取り扱うことができ、自由度の大幅な削減が可能である。例えば、防撓材間を一つの板要素でモデル化することが可能である。しかし ISUM を縦曲げ崩壊解析やホールドモデルに適用するためには、要素と解析システムの両面のさらなる拡張が必要である。一方、有限要素法に基礎を置く効率的解法として、動的陽解法の適用が考えられる。動的陽解法は、マトリックス演算を必要としないため大規模自由度の問題に適している。しかし、時間刻みが制約されるため、準静的な強度解析に適用するためには一般に多大の時間ステップを必要とする。

以上の背景の下、本研究では、船体の逐次崩壊挙動を効率的に解析する手段として、ISUM、および動的陽解法による準静的解法に注目し、前者については3次元構造解析に必要な要素並びに解析システムの開発を行う。また後者については、座屈・塑性崩壊挙動を求める上での解析条件の明確化を行う・さらにこれらの解析、さらには実験より、種々の荷重条件に対する船体の逐次崩壊挙動を明らかにすることを目的とする。

## 研究組織

研究代表者： 藤久保 昌 彦 (広島大学大学院工学研究科 教授)  
研究分担者： 北 村 充 (広島大学大学院工学研究科 教授)  
研究分担者： 岡 澤 重 信 (広島大学大学院工学研究科 助教授)  
研究分担者： 安 川 宏 紀 (広島大学大学院工学研究科 教授)  
研究分担者： 柳 原 大 輔 (岡山県立大学情報工学部 助手)  
研究分担者： 山 本 元 道 (広島大学大学院工学研究科 助手)  
研究分担者： 正 岡 孝 治 (大阪府立大学大学院工学研究科 教授)  
研究分担者： 原 田 実 ((財)日本海事協会技術研究所 研究員)

## 交付決定額 (配分額)

(金額単位：千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 16 年度	8,000	2,400	10,400
平成 17 年度	6,100	1,830	7,930
平成 18 年度	3,200	960	4,160
総 計	17,300	5,190	22,490

## 研究発表

### (1) 学会誌等

- [1] P. Kaeding, D.V. Olaru, M. Fujikubo: Development of ISUM Plate Element with Consideration of Lateral Pressure Effects and Its Application to Stiffened Plates of Ships, Proc. of 9th Int. Symposium on Practical Design of Ships and other Floating Structures (PRADS2004), Vol.1, 2004, pp.148-155.
- [2] Z.Y. Pei and M. Fujikubo: Application of Idealized Structural Unit Method to Progressive Collapse Analysis of Ship's Hull Girder under Longitudinal Bending, Proc. of 15th Int. Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2005), Vol. IV, 2005, pp. 25-36.
- [3] M. Fujikubo: Development of ISUM Plate Element Considering Lateral Pressure Effects and Its Application to Stiffened Plates, 西部造船会会報, 第 109 号, 2005, pp. 25-36.
- [4] 藤久保昌彦, 裴志勇: 理想化構造要素法による船体の縦曲げ逐次崩壊解析, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 1 号, 2005, pp.187-196.

- [5] 石橋公也, 藤久保昌彦, 矢尾哲也 : 有孔パネルの応答を表す ISUM 要素の開発について, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 1 号, 2005, pp.347-350.
- [6] 岡澤重信, 藤久保昌彦, 長谷圭晃 : パネルの準静的崩壊解析への動的陽解法の適用性について, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 2W 号, 2006, pp.1-4.
- [7] 石橋公也, 藤久保昌彦, 矢尾哲也 : 有孔パネルの応答を表す ISUM 要素の開発—短辺方向荷重を受ける場合の崩壊挙動の再現—, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 3 号, 2006, pp.293-302.
- [8] K. Ishibashi, M. Fujikubo and T. Yao: Development of ISUM Element for rectangular Plate with Cutout, Proc. of 16th Int. Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2006), Vol. IV, 2006.
- [9] 石橋公也, 藤久保昌彦, 矢尾哲也 : 桁構造の崩壊挙動を再現する ISUM 要素の開発と二重底構造の崩壊解析への適用, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 3 号, 2006, pp.373-376.

(2) 口頭発表      なし

(3) 出版物        なし

研究成果による工業所有権の出願・取得状況                      なし

## 研究成果の概要

### (1) 面内圧縮と水圧荷重を考慮できる ISUM 板要素の開発

(研究論文[1, 3]参照)

面内圧縮と水圧による横荷重を考慮可能な ISUM 板要素を開発した。要素のたわみ形状関数として、圧縮による座屈崩壊モードに、水圧による周辺固定モードの形状関数を新たに付加した。この付加項については、曲げ応力の発生のみを考慮し、大たわみの影響は無視した。本要素を用いて板単独および連続防撓パネルのそれぞれについて面内圧縮と水圧の組み合わせ荷重下の座屈・塑性崩壊挙動を解析した。その結果、有限要素法と良好に一致する崩壊挙動が 1/100 オーダーの計算時間で求められることを示した。

### (2) ISUM による船体の縦曲げ逐次崩壊解析システムの開発

(研究論文[2, 4]参照)

ISUM による船体の縦曲げ逐次崩壊解析システムを開発した。まず、従来の ISUM 板要素および防撓材要素を、溶接残留応力の影響を考慮できるよう拡張した。具体的には要素の数値積分点に溶接残留応力を初期応力として与えた。この ISUM モデルにより、溶接残留応力を有する連続防撓パネルの座屈・塑性崩壊挙動を最終強度後の挙動を含めて精度良く解析できることを示した。

つぎに、単位フレームスペース長さの船体スリットモデルについて、断面平面保持の仮定の下に縦曲げ逐次崩壊挙動を解析した。1/3 スケールのフリゲート艦構造模型および実稀シングルハル VLCC について崩壊挙動を解析し、実験結果および FEM による詳細解析との比較より、ISUM の高い精度の適用性を明らかにした。計算時間は FEM の約 1/75 であった。

### (3) 有孔パネルの応答を表す ISUM 要素の開発

(研究論文[5, 7, 8]参照)

船体構造の逐次崩壊挙動を ISUM で解析するためには、甲板、船底板など、主として圧縮荷重を座屈の主要因とする板および防撓パネルに加えて、ガーダー、フロアなどの桁部材の挙動を表す ISUM 要素の開発が必要である。桁部材の特徴として、大きな曲げ荷重および剪断荷重を受ける他、通行用或いはパイプを通すための開口を有することが挙げられる。そこで、FEM を用いてアスペクト比、板厚、開口の大きさ、位置、形状を変化させた有孔パネルの弾塑性大撓み解析を実施し、その知見から有孔パネルの座屈・塑性崩壊挙動を表せる ISUM 要素を開発した。具体的には、曲げと圧縮の組み合わせ荷重下のたわみモードを考慮できるたわみ形状関数を導入した。開孔影響は、開孔の存在により剛性および強度に寄与しない領域を、ひずみ成分に応じて積分領域から除外することにより考慮した。本手法により、有孔パネルの座屈・塑性崩壊挙動を良好な精度で解析できることを示した。同時に、最終強度後の耐力の低下を再現する上で、高次たわみモードの発生と面内ひずみの局所化の影響を考慮する必要があることを課題として示した。

#### (4) ISUMによるダブルハル構造の逐次崩壊解析システムの開発

(研究論文[9]参照)

ISUMの目的は、3次元板骨構造としての船体の効率的な逐次崩壊解析システムを構築することにある。そのためには、船体の主要構造要素であるダブルハル構造の効率的なモデル化が必要である。ダブルハル構造の解析は、これまでも行われたが、これまでのモデルは桁部材にチモシェンコ梁要素を使用したため、面内圧縮と面内曲げの組み合わせ荷重下の座屈挙動の再現性や開孔影響の考慮の仕方に課題があった。また、船底板、内底板の防撓パネルとの結合に面倒な手順を要した。そこで本研究では、(3)で開発した桁要素と、(1)および(2)の防撓パネルモデルの組み合わせによるダブルハル構造の解析システムを開発した。矩形要素の組み合わせによりモデル化が容易であるだけでなく、桁に対する曲げおよび圧縮力の作用を自動的に考慮でき、開孔も考慮可能である。

開発したモデルを用いて水圧荷重を受ける二重底構造の崩壊挙動を解析し、同一モデルのFEM解と比較した。その結果、ISUMにより、FEMとほぼ同一の最終強度および崩壊モードを得ることができた。また桁の曲げ座屈は、水圧による横荷重下の二重底構造の最終強度に有意な影響を与えることを示した。

#### (5) パネルの準静的崩壊解析への動的陽解法の適用性に関する研究

(研究論文[6], 資料1参照)

動的陽解法はマトリックス演算を必要としないため、大規模自由度の問題の解析を可能にするが、時間増分が条件安定であるため、衝突、爆発のように短時間の荷重作用の問題には適するが、静的な応答の解析には不向きである。しかしながら、陽解法の利点を静的解析において最大限活用する上で、安定かつできるだけ時間刻みを大きくするための指針を明確にすることはあらゆる問題において重要である。

そこで、面内圧縮を受ける板および防撓パネルを対象として、動的陽解法による座屈・塑性崩壊挙動を解析し、準静的と見なしうる荷重速度の条件および時間刻みを調べた。その結果、座屈を伴う準静的崩壊挙動を動的陽解法で解析する場合において、安定性および計算時間の点で最適な荷重速度の指標は、座屈モードに類似の固有振動の固有周期であり、その1/10以下程度の荷重負荷時間が適切であることを示した。

#### (6) ボックスガーダーモデルの縦曲げ崩壊試験と崩壊解析

(資料2参照)

船体の縦曲げによる折損事故は、波浪による繰り返し荷重下でホギング、サギングの曲げモーメントが繰り返し作用し、主として座屈部から亀裂が発生し大規模な破壊に至る場合が多いと考えられる。このような繰り返し縦曲げ荷重下の船体の崩壊挙動を調べると共に、ISUMの精度検証のための基礎データを得る目的でボックスガーダーの縦曲げ崩壊試験を実施した。その結果、座屈後の亀裂発生は、実験では甲板と側板が直角に交差する箇所のみならず、隅部に生じた。現実の船体ではコーナー部は円弧状であり、かつ材質に優れる材料が



使用されるため、実現象を反映した挙動とは言い難いが、繰り返し载荷による塑性変形の累積が曲げモーメント～曲率関係に及ぼす影響に関する貴重な知見が得られた。ISUM との比較については、実験では荷重が断面に均一に伝達されなかったことにより、実験結果の精度そのものに問題点が存在した。そこで、既存の縦曲げ崩壊試験と本研究で開発した ISUM を比較した結果、曲げモーメント～曲率関係においてきわめて良好な一致が得られ、ISUM の適用性が検証された。

## <資料 1> 動的陽解法による準静的崩壊シミュレーションにおける荷重速度条件について

### 1. 緒言

構造物あるいは構造部材の静的強度を有限要素法で解析する場合、材料および幾何学的非線形性を考慮して剛性方程式を求め、これを静的陰解法に基づく繰り返し計算により解析する方法が一般的である。しかし静的陰解法は、マトリックス演算を必要とするため、船体のような大規模構造になると、発達した現在の計算機の能力をもってしても計算コストが莫大なものとなる。また非線形性が強い応答では、収束解が得られない場合が発生する。一方、動的陽解法はマトリックス演算を必要としないため、大規模構造の解析に適している。また飛び移り挙動のように静的計算では一般に収束計算が難しい現象に対してもロバストな解析方法である。

そこで、動的陽解法を用いて準静的な崩壊解析を行い、静的強度を近似的に評価しようとする動きがある。しかし、陽解法にも欠点が存在する。それは、時間増分が Courant 条件によって支配されることである。すなわち、安定な解を得るためには、時間増分が Courant 条件で定められる時間刻みよりも小さくしなければならない。そのため、準静的解析とするために荷重速度を十分に小さくし動的な現象を起こさないようにすると、時間ステップ数が増大し、計算コストが大きくなり動的陽解法を用いる利点が失われる。そこで、動的陽解法において時間増分を大きくする方法として、マス・スケーリング法が用いられる。マス・スケーリング法とは、密度  $\rho$  を実構造物よりも増減させることにより、Courant 条件の制約を緩める方法である。しかしこれにより仮想的な材料を想定することになるため、根本的解決とはいえない。

本研究では動的陽解法により準静的な崩壊挙動を解析する場合の支配的影響因子として荷重速度に注目する。そして、船体構造で重要な板および防撓パネルの座屈・塑性崩壊挙動を対象として、適切な荷重速度の定め方について指針を得ることを目的とする。

### 2. 荷重速度と応答

Fig.1 に、辺長が 2400mm×800mm で板厚 10mm の周辺単純支持矩形パネルに長辺方向に面内圧縮変位を加えた場合の平均圧縮応力～平均圧縮ひずみ関係を示す。解析は、静的陰解法と動的陽解法の両者を用いて行い、動的陽解法では圧縮変位速度が  $v=0.1\text{mm/sec}$  と  $v=100\text{mm/sec}$  の 2 種類の荷重速度を取り上げた。Fig.2 に  $v=0.1\text{mm/sec}$  の動的陽解法解析で得られた崩壊モードを示す。なお、いずれの解析でも、最大たわみが板厚の 1/100 の座屈モードの初期たわみを仮定した。

Fig.1 を見ると、荷重速度  $v=0.1\text{mm/sec}$  では、最終強度に至るまでは静的陰解法による解析結果とほぼ同様の挙動が得られている。最終強度後、耐力が急に低下するのは、Fig.2 に示すように塑性変形が局所化し他の部分では除荷が発生するため、板全体として圧縮変位があまり増加しない状態で耐荷力が低下するためである。一方、荷重速度  $v=100.0\text{mm/sec}$  に

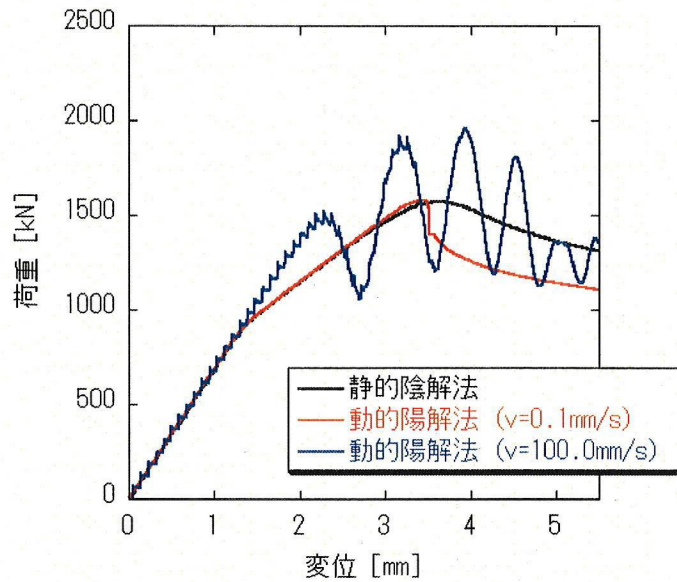


Fig.1 面内圧縮を受ける矩形パネルの圧縮荷重～圧縮変位関係の比較

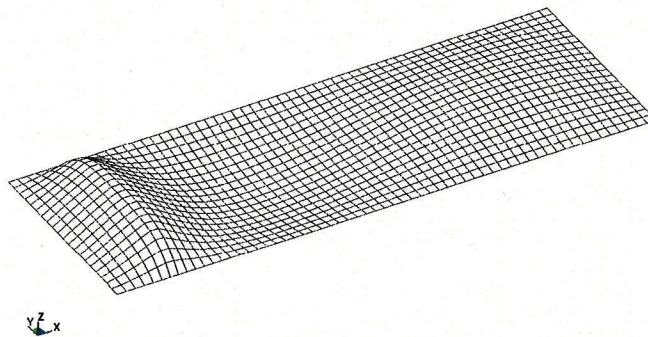


Fig.2 動的陽解法で得られた矩形パネルの崩壊モード (圧縮変位=5.5mm)

においては、解析開始直後から周期の短い振動が生じており、最終強度に至る頃には周期の大きな振動が生じている。これらの動的応答の結果として、耐荷力の最大値は、静的な最終強度を上回っている。

次に、Fig.3に辺長2400mm×800mm、板厚13.5mmのパネルに深さ300mm、板厚20mmの平鋼防撓材を取り付けた連続防撓パネルの解析結果を示す。ここでも、荷重速度が  $v=0.1\text{mm/sec}$  では最終強度は静的陰解法の結果とよく一致するが、 $v=100\text{mm/sec}$  では、振動が励起され、最終強度は静的解析より高めになっている。

以上の計算結果から判明した興味深い点の一つは、最終強度付近から見られる振幅の大きな振動のモードは、パネルの座屈モードに近いたわみモードであるという点である。Fig.5に、Fig.1の矩形パネルの変形モードと3次までの固有振動モードを示す。矩形パネルには無数の固有振動モードが存在するが、その中で座屈モード（解析例では、板の長さ方向に3半波のモード）に近い固有振動モードが誘起されること、また振動周期も、当該固有振動モ

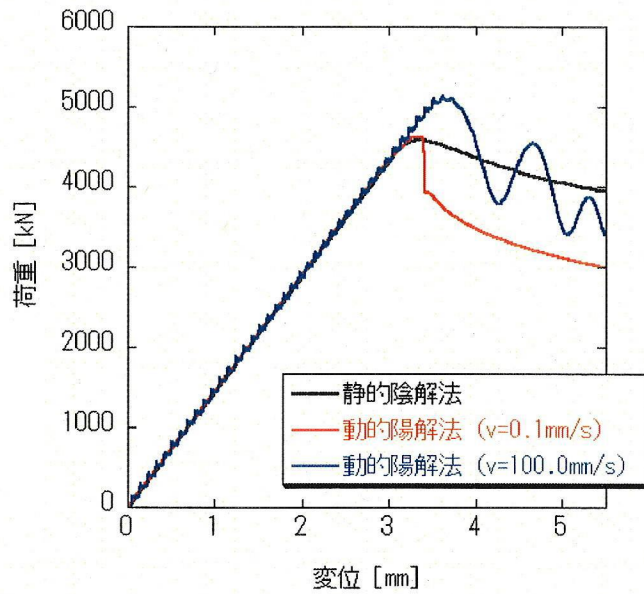


Fig.3 面内圧縮を受ける連続防撓パネルの圧縮荷重～圧縮変位関係の比較

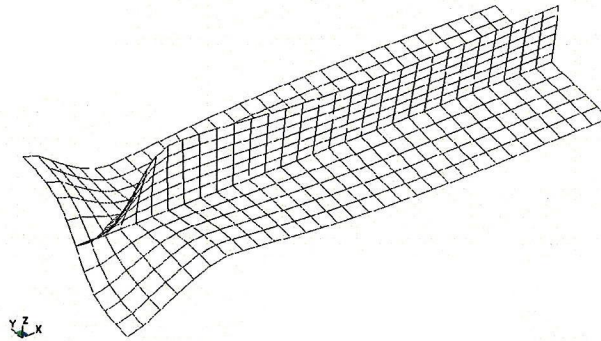


Fig.4 動的陽解法で得られた防撓パネルの崩壊モード（圧縮変位=5.5mm）

ードの固有周期に近いことがわかった。このことは、動的陽解法で準静的解を得るための荷重速度条件を考える上で、座屈モードにたわみ形状に近いモードの固有周期が重要なパラメータになることを示唆している。

次に、 $v=0.1\text{mm/sec}$  の動的陽解法の結果と静的陰解法の結果を比較すると、動的陽解法では上述のように塑性変形の局所化が生じるが、静的陰解法の結果には局所化は見られず、初期たわみと同じ3半波モードの変形のみが増加する。このことは、動的解析では、振動による微小な擾乱が常に生じており、その影響によって、より低いエネルギーレベルの釣り合い経路に移行することを示している。現実の構造では初期たわみは様々なたわみモード成分を有しており、また動的影響も現実には存在することから、塑性変形の局所化を生じる動的解析の結果が、静的陰解法の結果よりも実現象をより正確に再現していると考えられる。

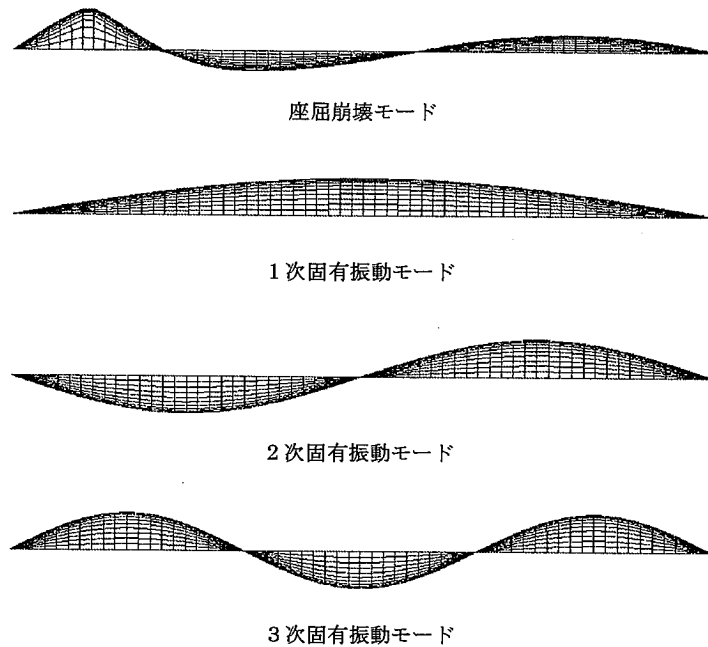


Fig. 5 矩形パネルと圧壊モードと固有振動モード

### 3. 動的陽解法で準静的応答を得るための荷重速度要件の検討

#### 3. 1 評価の指標

動的陽解法により準静的応答を求めるための荷重速度要件を検討する上で、ここでは解析結果の評価指標として、動的陽解法で求められる最終強度 $\sigma_{du}$ と静的陰解法による最終強度 $\sigma_{su}$ の比、すなわち次式のパラメータ $\sigma$ を取り上げる。

$$\sigma = \frac{\sigma_{du}}{\sigma_{su}} \quad (1)$$

一方、荷重速度の指標として、次のパラメータ $\tau$ を取り上げる。

$$\tau = \frac{t_{cr}}{T} \quad (2)$$

ここで $T$ は、座屈モードに類似する固有振動モードの固有周期を、また $t_{cr}$ は圧縮応力がゼロから座屈応力に達するまでの時間を表す。時間 $t_{cr}$ が固有周期 $T$ に比べて十分に長ければ、荷重は準静的と見なせると考えられる。逆に $t_{cr}$ が $T$ に比べて短いほど座屈モードの固有振動が励起されやすいと考えられる。

なお $t_{cr}$ は、座屈応力を $\sigma_{cr}$ 、板の全長を $l$ 、ヤング率を $E$ 、圧縮強制変位速度を $v$ で表すと次式で与えられる。

$$t_{cr} = \frac{\sigma_{cr} l}{Ev} \quad (3)$$

### 3. 2 動的影響の評価

#### 3. 2. 1 矩形パネル

崩壊挙動に及ぼす荷重速度の影響を考察することを目的として、矩形パネルの崩壊解析を行った。Fig.6 は、同一寸法の防撓材が等間隔に配置された連続防撓パネルを表す。Fig.6 において色付けされた矩形パネル領域を考え、Fig.7 のようにシェル要素でモデル化する。境界条件は周辺単純支持とし、長辺方向に面内圧縮変位を加える。パネル寸法は、 $a \times b \times t_p = 2,400 \times 800 \times 10\text{mm}$  である。ヤング率  $E = 207000\text{ MPa}$ 、降伏強度  $\sigma_Y = 315.0\text{ MPa}$  の完全弾塑性体を仮定する。動的陽解法解析には、汎用解析プログラム LS-DYNA を使用する。初期たわみは、3 半波の正弦波初期たわみとし最大初期たわみ量は板厚の  $1/100$  とする。

各荷重速度における動的陽解法解析の結果について述べる。Fig.8 にパネルの平均圧縮応力と平均圧縮ひずみ関係を示す。 $\sigma/\sigma_Y = 0.4$  付近で弾性座屈が生じ 3 半波の座屈変形が生じた後、最終強度に達する。最終強度後に塑性変形の局所化が生じる。荷重速度が  $v = 50.0\text{ mm/sec}$  では、弾性座屈後に振動が生じ、明らかな動的挙動が生じている。 $v = 10.0\text{ mm/sec}$  でも、座屈後、わずかに振動が生じている。

これらの結果より、式(1)のパラメータ  $S$  を式(2)のパラメータ  $T$  に対してプロットした結果を Fig. 9 に示す。この図から、最終強度に有意な影響を与えない荷重速度範囲は、 $T < 0.1$  の範囲であると評価できる。

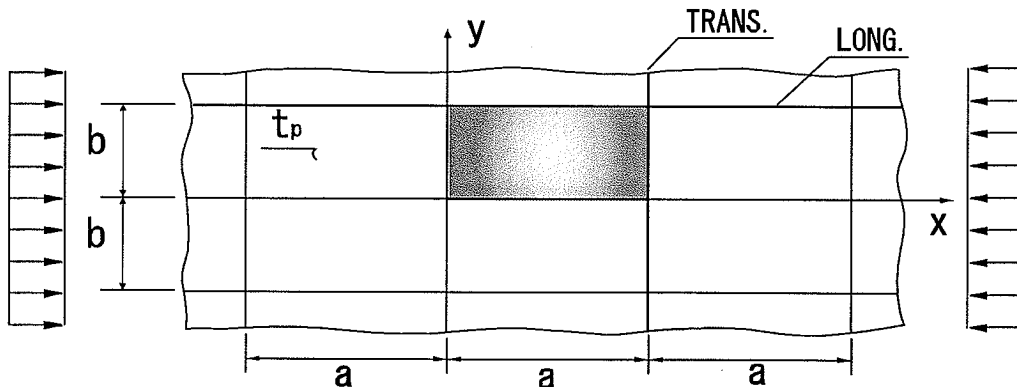


Fig. 6 長辺方向の面内圧縮を受ける矩形パネル

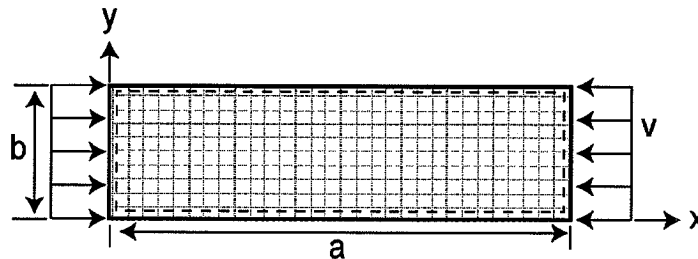


Fig. 7 FEM モデル (矩形パネル)

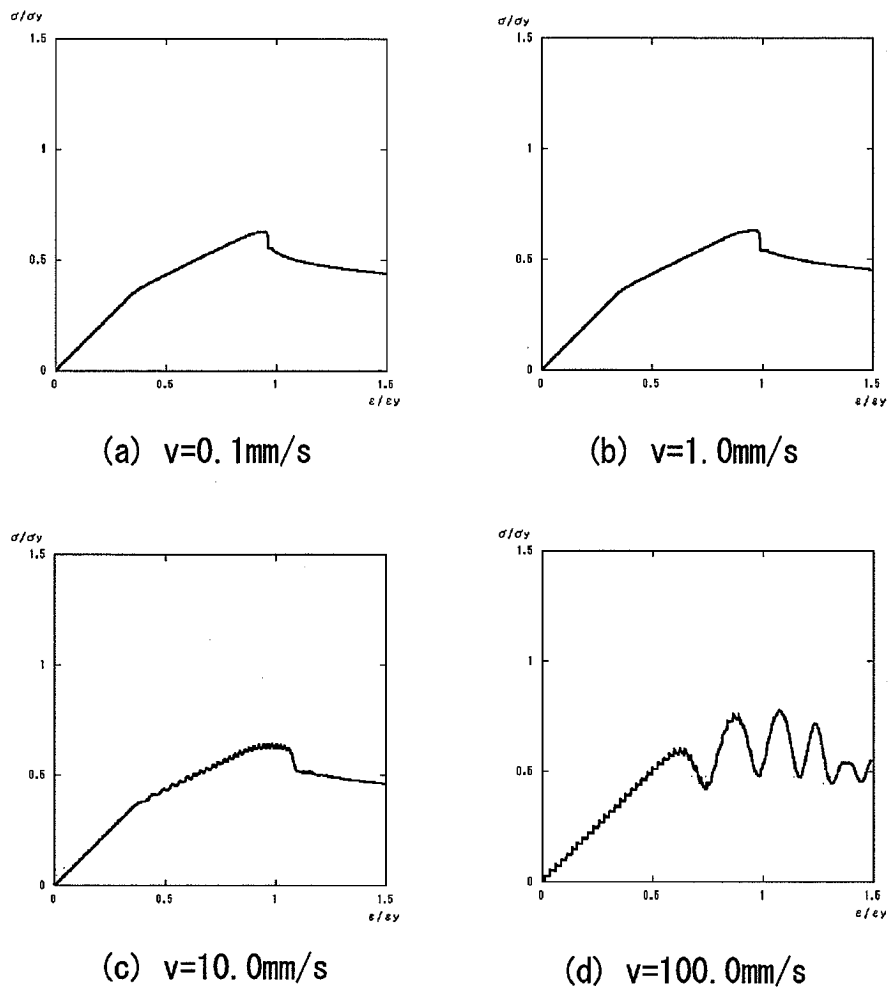


Fig. 8 種々の荷重速度における平均圧縮応力～平均圧縮ひずみ関係（矩形パネル）

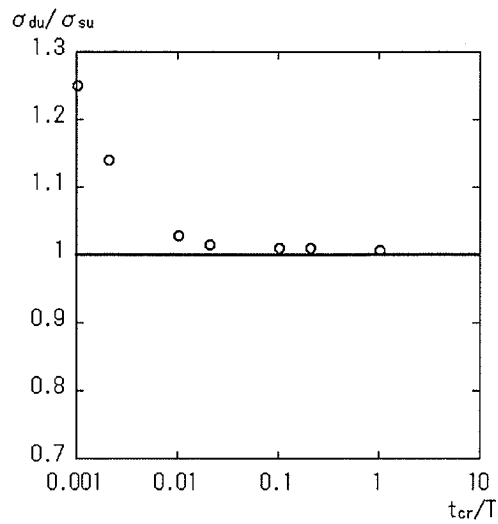


Fig. 9 最終強度に対する荷重速度の影響（矩形パネル）

### 3. 2. 2 連続防撓パネル

つぎに Fig.10 の連続防撓パネルに防撓材方向の面内圧縮が作用する場合を解析する。解析は、Fig.10 おいて色付けされたダブルスパン・ダブルベイの領域を考える。ロンジ材とトランス材の交差部を中心に、両側 1/2 スパンおよび 1/2 ベイの範囲を考え、モデル境界では対称条件を仮定する。トランス材はモデル化しないが、この位置でパネルのたわみを拘束する。

防撓材間のパネル寸法は、 $a \times b \times t_p = 2,400 \times 800 \times 13.5\text{mm}$  とする。防撓材は、 $h \times t_s = 300 \times 20\text{mm}$  の寸法を有する平鋼とする。材料定数はパネル・防撓材ともヤング率  $E = 207000\text{MPa}$ 、降伏強度  $\sigma_Y = 315.0\text{MPa}$  の完全弾塑性体を仮定する。Fig.11 に解析モデルと境界条件を示す。

動的陽解法解析では、矩形パネルの解析と同じように荷重速度  $v = 0.1 \sim 100.0\text{mm/sec}$  を与えた。パネル初期たわみとして、ロンジ方向に 3 半波の座屈モードの初期たわみを与えた。防撓材には長さ方向 1 半波の Euler 座屈モードの初期たわみを考え、その最大値を防撓材  $t_s / 100$  とする。溶接残留応力の影響は無視する。

Fig.12 に平均圧縮応力～平均圧縮ひずみ関係を示す。また、Fig.13 に式(1)のパラメータ  $\sigma$  を式(2)のパラメータ  $\tau$  に対してプロットした結果を示す。この図から、矩形パネルと同様に  $\tau < 0.1$  の範囲であれば静的とみなせる解析が行われていると判断できる。

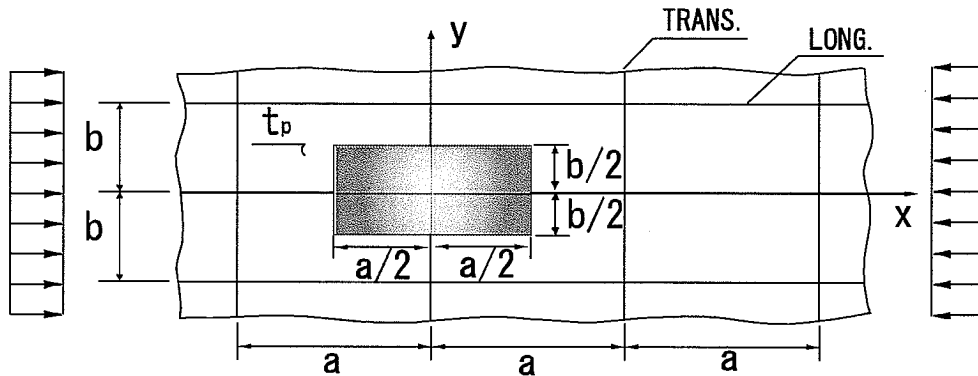


Fig. 10 長辺方向の面内圧縮を受ける連続防撓パネル

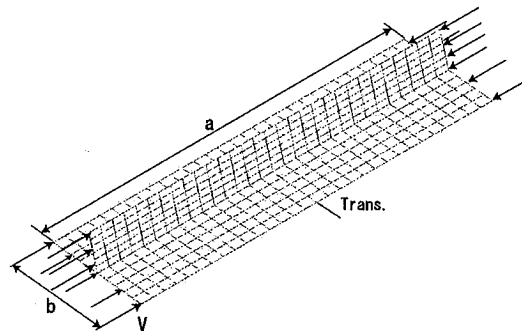


Fig. 11 FEM モデル (連続防撓パネル)



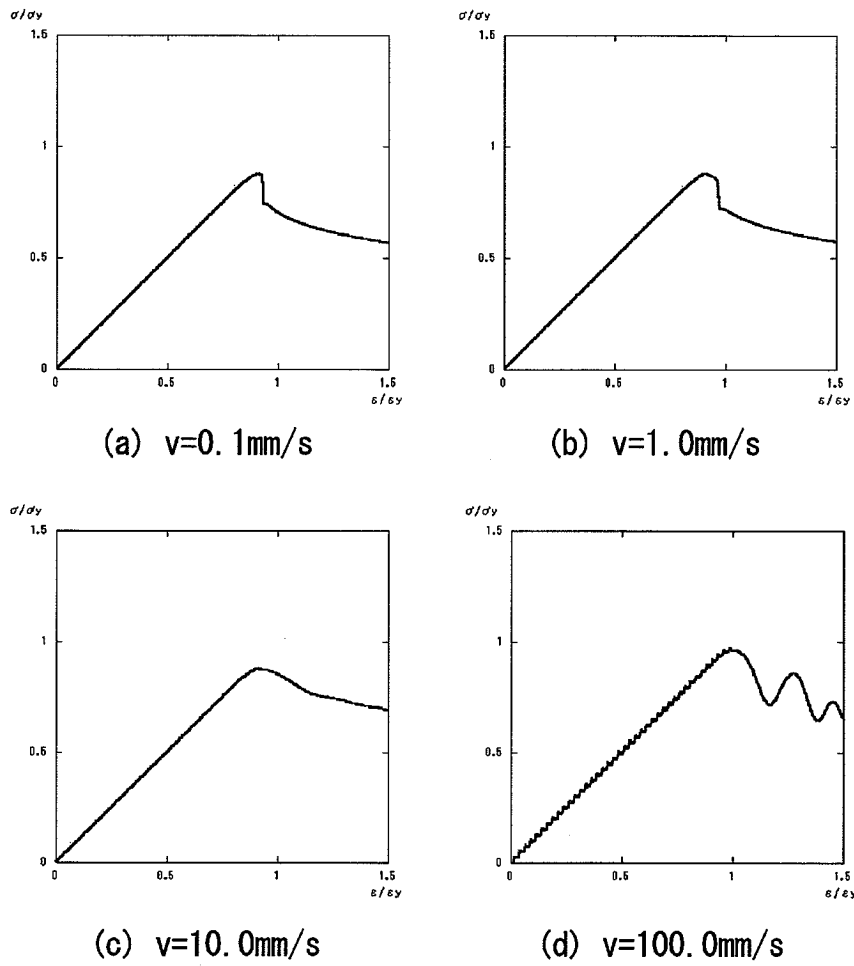


Fig. 12 種々の荷重速度における平均圧縮応力～平均圧縮ひずみ関係（連続防撓パネル）

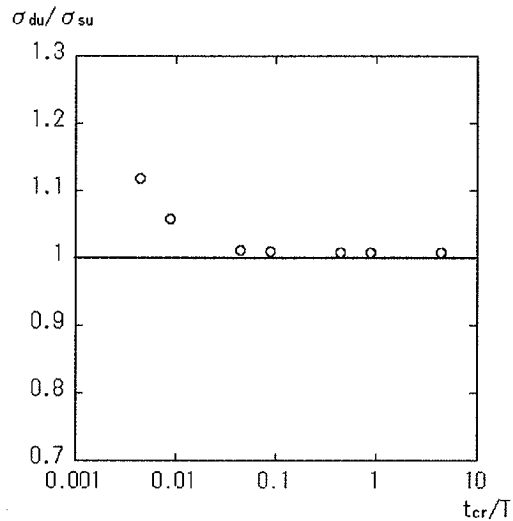


Fig. 13 最終強度に対する荷重速度の影響（連続防撓パネル）

#### 4. 結言

本研究では、パネル、防撓パネルを対象として動的陽解法解析を実施し、準静的解析とみなせる荷重速度の条件について検討した。主な結論は次の通りである。

- (1) 動的陽解法解析において、動的擾乱の作用により初期たわみに関わらず、最終強度後に塑性変形の局所化が生じる。
- (2) 本研究で取り上げた矩形パネルおよび連続防撓パネルの圧壊挙動においては、準静的挙動を見なせる荷重速度の範囲は  $t_{cr}/T < 0.1$  である。ここで、 $T$  は、座屈モードに類似する固有振動モードの固有周期を、また  $t_{cr}$  は圧縮応力がゼロから座屈応力に達するまでの時間である。

なお、本研究では矩形板および防撓パネルレベルの解析について検討したが、縦曲げ逐次崩壊解析やホールド解析のような大規模な構造解析でも、板および防撓パネルのレベルで荷重速度が本研究結果の範囲に入るよう、荷重速度を選ぶことにより、動的陽解法により準静的崩壊挙動を合理的な時間刻みを用いて精度良く解析可能と考えられる。ただし、このことの検証のため、アスペクト比を変化させた解析やより複雑な構造物での解析が必要である。

## ＜資料 2＞ ボックスガーダー試験体の縦曲げ崩壊試験と崩壊解析

### 1. 緒言

船体の縦曲げによる折損事故は、波浪による繰り返し荷重下でホギング、サギングの曲げモーメントが繰り返し作用し、主として座屈部から亀裂が発生し大規模な破壊に至る場合が多いと考えられる。このような繰り返し縦曲げ荷重下の船体の崩壊挙動を調べると共に、ISUM の精度検証のための基礎データを得る目的でボックスガーダーの縦曲げ崩壊試験を実施した。

### 2. 試験方法および試験体

曲げ崩壊試験は、Fig.1 に示すように 4 点曲げ載荷装置により行った。油圧ジャッキによりサンギング、ホギング両方向の曲げモーメントを載荷可能である。荷重は、ジャッキ直上のトランスリングを介して断面に伝達する。片側の支持点は長円にして長手方向にスライド可能としている。

スパン中央部に取り付ける試験体部分の詳細を Fig.2 に、また載荷梁の詳細を Fig.3 に示す。試験体は、載荷梁にボルト結合する。試験体のパネル部はフラットバー防撓材で補剛している。パネル板厚は 3.2mm、防撓材板厚は 4.5mm である。試験体中央部の長さ 651mm の範囲が供試部分であり、この部分の矩形板のアスペクト比は、上下のフランジパネルが 3.0、サイドパネルが 4.0 である。供試部と治具の間にアスペクト比 1.0 程度のパネル部を設けることにより、供試部端部に対する治具による変形拘束を緩和している。防撓材は端部のテーパ部分を含めて全通部材としている。材料は軟鋼であり、材料試験で得られた降伏応力は、パネルが 300MPa、防撓材が 250MPa である。

載荷試験に先立ち、パネルおよび防撓材の初期変形計測を行った。また同一隅肉脚長で製作した防撓パネルについて、ひずみ解放法による残留応力計測を実施した。Fig.4 に変形を 12 倍に拡大した初期変形の鳥瞰図を示す。変形量は、レーザー変位計を計測用治具によりスライドさせて一定間隔で計測した。パネルの初期たわみ量は、概ね 1~2mm 程度の範囲であるが、最大では上部フランジの panel4 に板厚と同程度の 3.3mm が生じていた。実船に比べて隅肉の溶接脚長が大きいため、初期たわみも大きめに生じている。防撓材の横倒れ初期たわみ量は約 1mm 程度であるが、最大は右側パネルの stiffener1 で 3.9mm であった。実際の船体では許容値はスパン長の 1/1000 程度であるため、試験体の横倒れ変形はこれに比べてかなり大きいと言える。初期変形には規則性が無く、一般に隅肉溶接後に見られる防撓材間のやせ馬モードの初期たわみは明確には見られない。むしろ、溶接残留応力の影響と見られる 3 半波の座屈モードの初期たわみの発生が認められる。

次に、パネル部の溶接残留応力の計測結果を Fig.5 に示す。図より、防撓材近傍では引張残留応力が存在し、パネル中央部では圧縮残留応力が存在し、自己平衡条件も概ね満足されている。ただし、圧縮残留応力はパネルの弾性座屈応力である 157MPa を超えるレベルまで達しており、残留応力によって座屈が生じていたことを裏付けている。

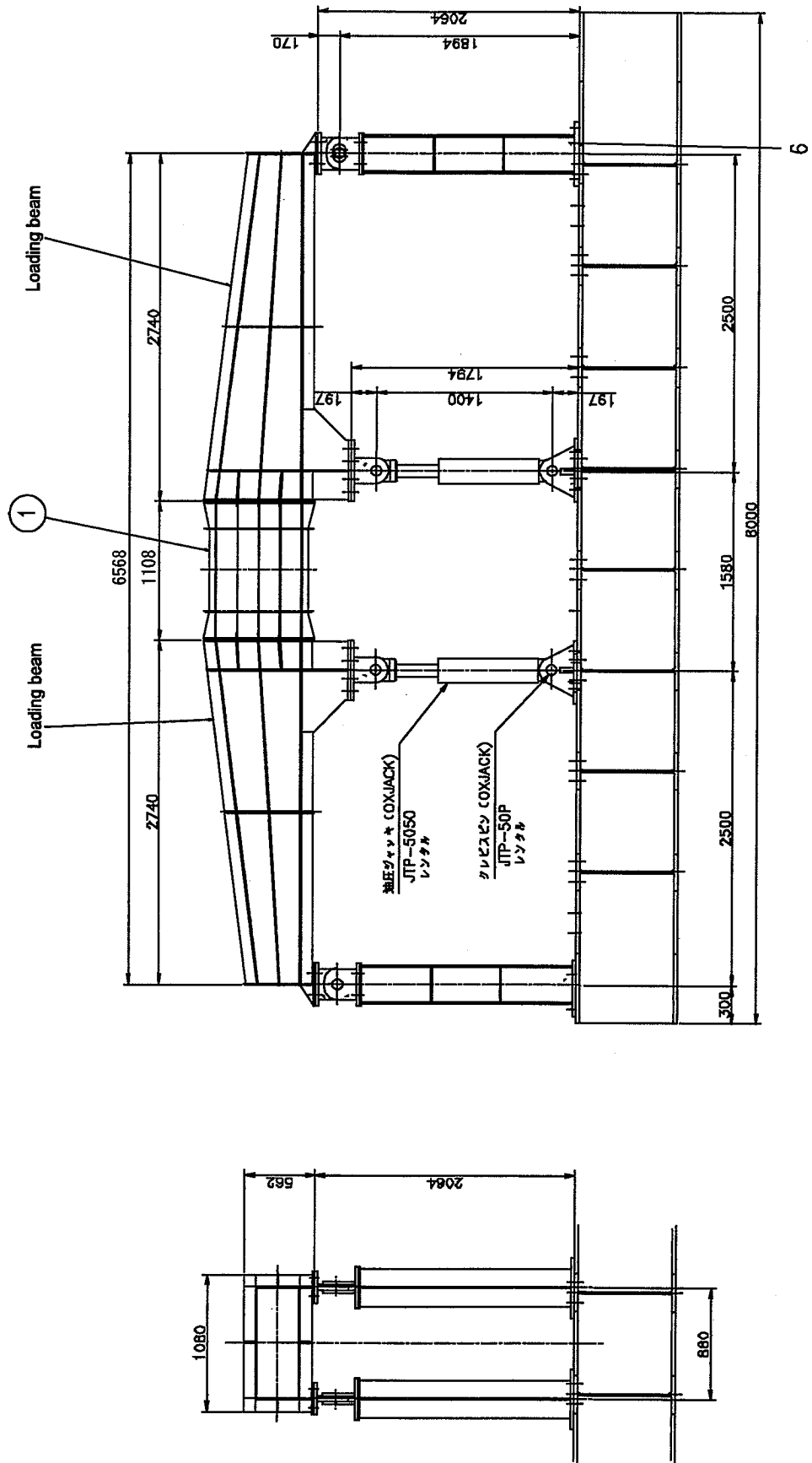


Fig.1 試験装置

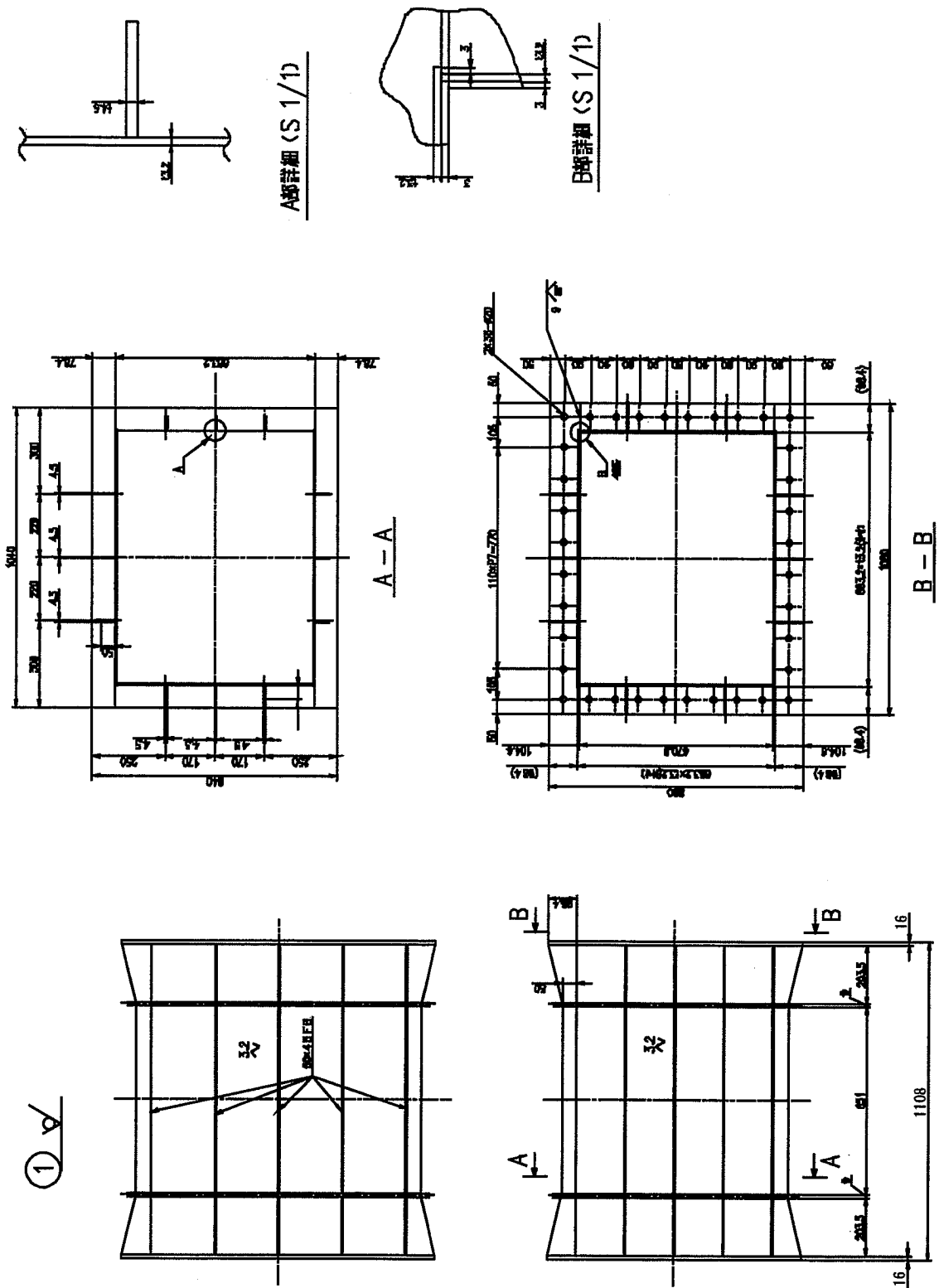
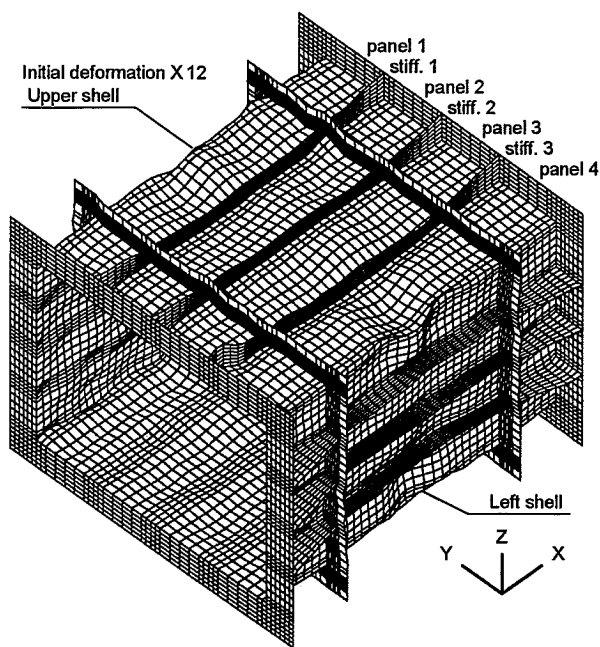
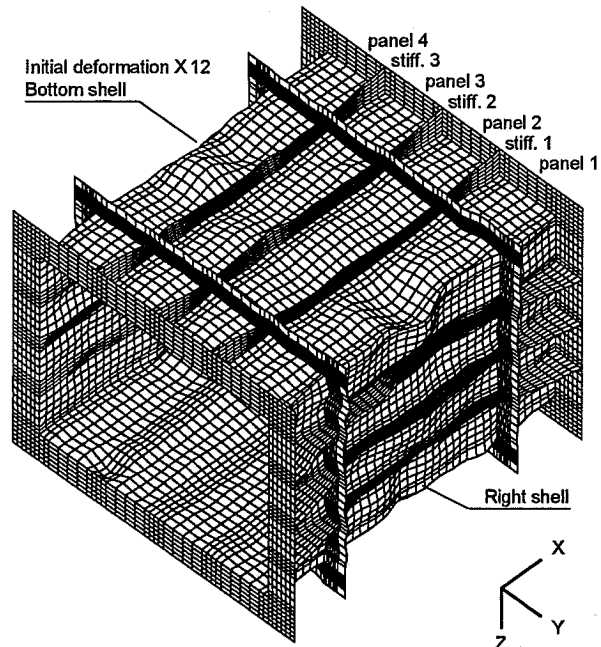


Fig.2 試験体

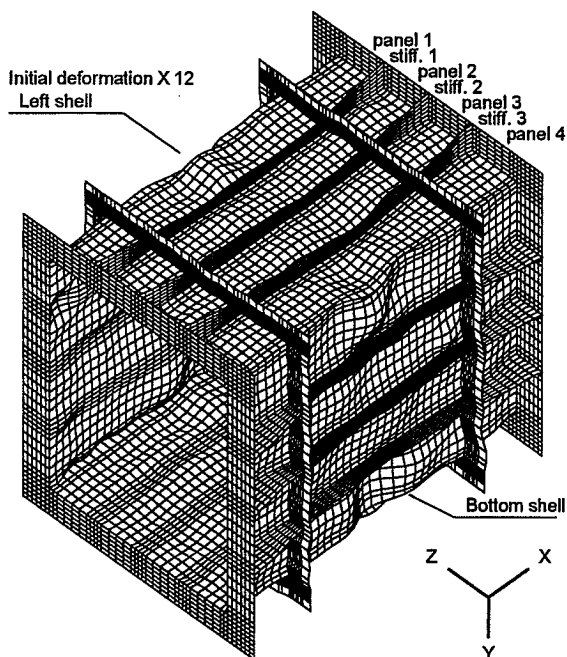




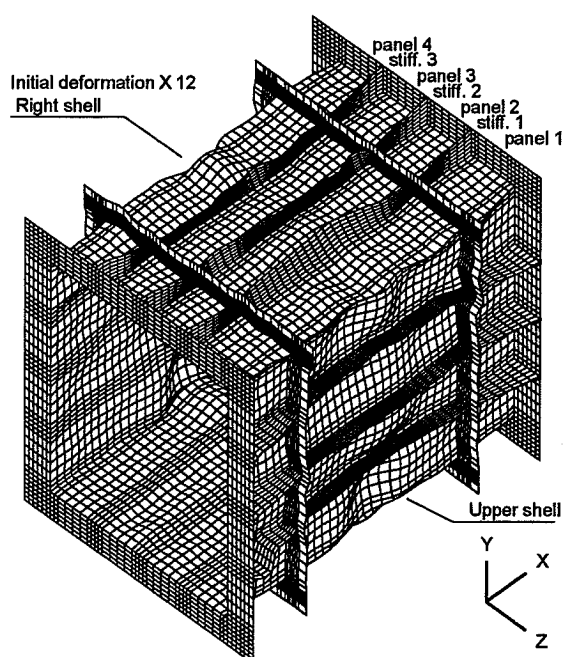
Upper flange panel



Lower flange panel



Left side panel



Right side panel

Fig.4 初期变形

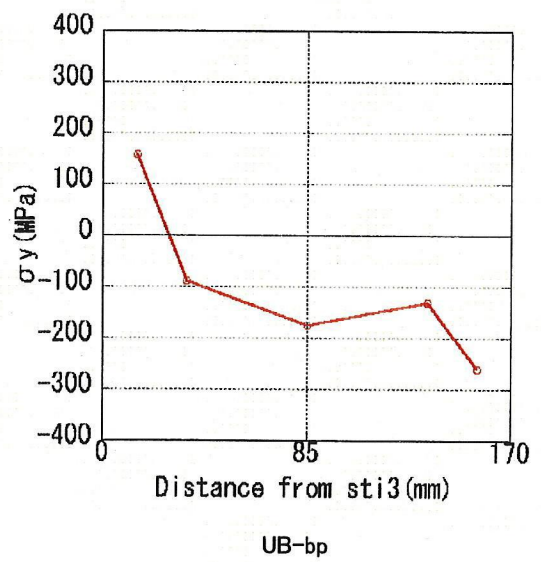
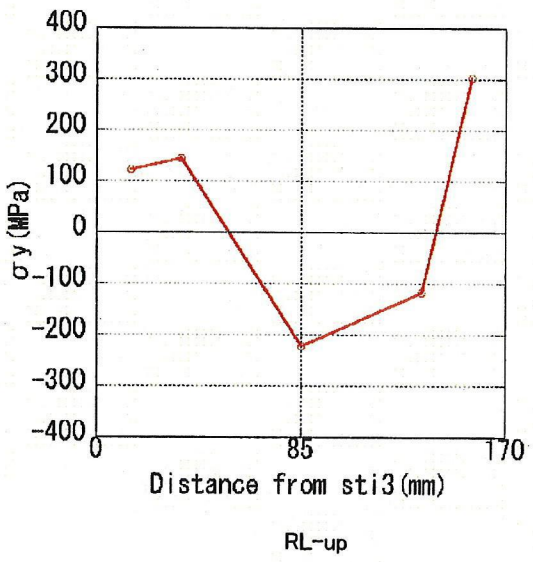
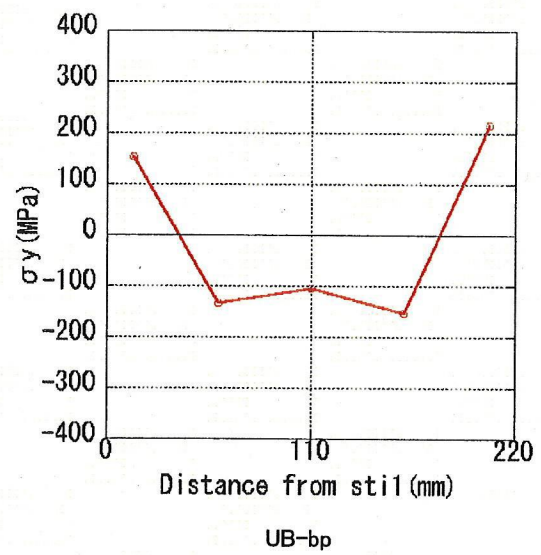
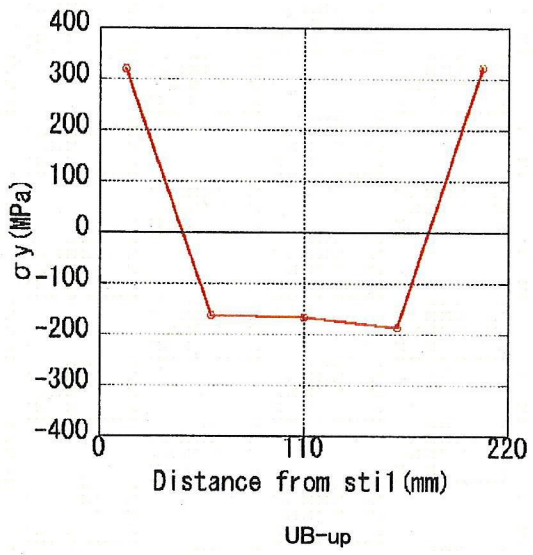
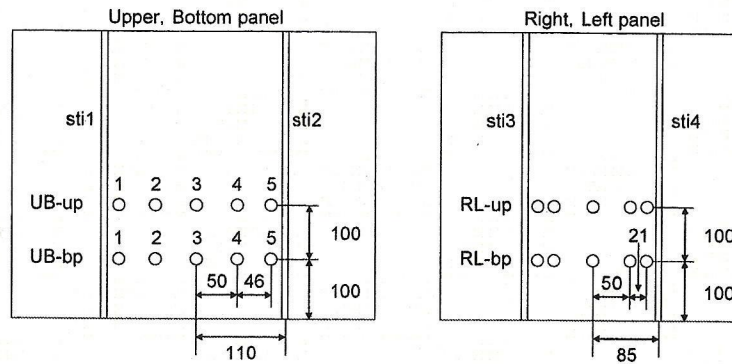


Fig.5 パネルの溶接残留応力



### 3. 試験結果

Fig.6 に、縦曲げ崩壊試験で得られたジャッキ荷重と荷重点変位の関係を示す。図は省略するが、パネルおよび防撓材ではひずみを計測しており、それらの結果によると、曲げ圧縮側では、どの矩形パネルも初期たわみの影響で、载荷の初期段階から曲げ変形が漸増し、載荷重が 100kN を超えたあたりで矩形パネルの表裏のひずみ差が急増して、この時点で座屈変形が顕著に増加した (Fig.7(a))。その後 150kN あたりで防撓材頂部の左右のひずみの差が大きくなり防撓材に横倒れ変形が生じた。Fig.6 でもこの付近より剛性低下が認められる。さらに載荷重 200kN 付近で、上部フランジの防撓パネルが全体座屈に生じ (Fig.7(b)) 最終強度に達した。

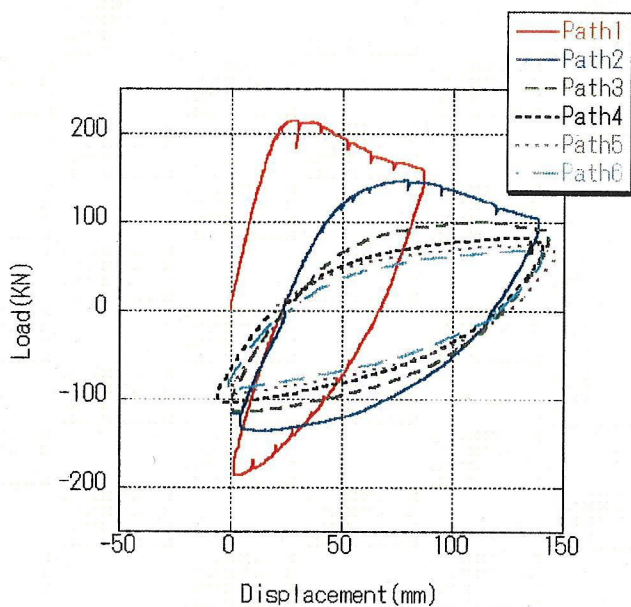
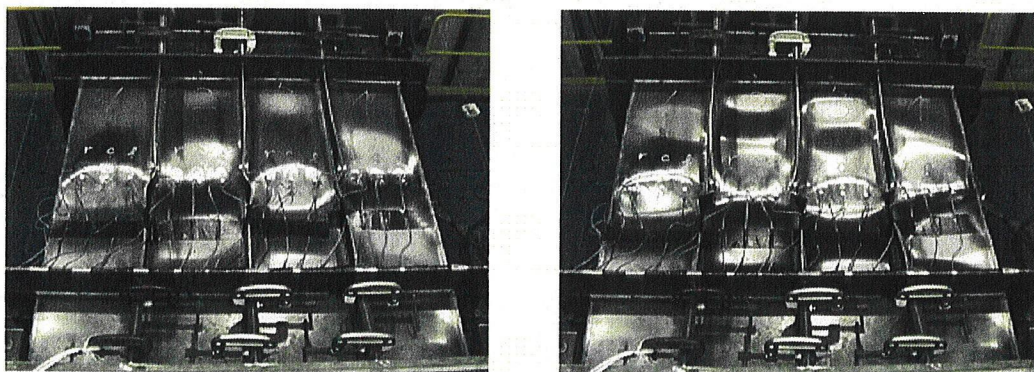


Fig.6 荷重～荷重点変位関係



(a) パネル座屈

(b) 最終強度時の変形

Fig.7 圧縮側防撓パネルの座屈変形

最終強度後はパネル及び防撓材の面外変形が増加するとともに耐荷力が低下した。実験では、ある程度たわみが増加した時点で荷重を除荷し、続いて下部フランジが圧縮側になる逆向きの曲げモーメントを負荷した。逆負荷時の剛性は初期負荷時の剛性に比べて小さい。これは上部フランジが座屈による面外変形を既に生じていることが主要因である。

その後再び除荷して、荷重を再び上部フランジが圧縮側となる向きに負荷する。このPath2のピーク値は最終強度よりも低く、最初の除荷時の荷重付近で頭打ちとなって、再び耐荷力が低下する。このようなサイクルを繰り返すと除荷・再負荷のループは次第に小さくなり、かつ座屈の影響で全体に平坦なループに変化する。

ところで船体の折損事故では、防撓パネル(一般に船体中央デッキ部の防撓パネル)の座屈部から亀裂が生じ、それが進展して船体の分離に至ったケースが報告されている。特に、曲げ圧縮側から亀裂が発生すると報告されている。これは、圧縮側の方が引張側よりも座屈後の繰り返し荷重によるひずみ振幅が大きいこと、また最初に圧縮のひずみを受けると材料が脆化することが原因と考えられる。また、パネルの座屈に伴い、防撓材にも一般に面外変形が生じ、そこから亀裂発生することも考えられる。しかし今回の試験では、座屈したパネル部、及び大きく面外変形する防撓材からは亀裂は発生せず、亀裂はFig.8のようにコーナー部から発生した。これはコーナー部で直角にフランジとサイドパネルが交差しているために溶接部のひずみ集中が大きいことと、初期からこの部分の初期たわみが大きく、早期に面外変形が生じたためと考えられる。

実際の船舶では甲板と船側パネルの交差部(コーナー部)は円弧状の形状を有し、かつ高強度・高延性の材料が使用されるため、試験のような破壊ではなく、甲板中央部から亀裂が発生すると考えられる。実船の挙動を予測するためには、コーナー部の曲率がひずみ集中に及ぼす影響をはじめさらに検討が必要である。

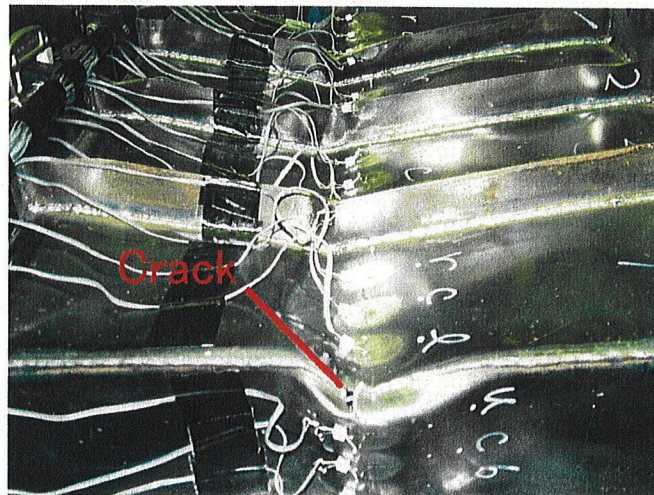


Fig.8 コーナー部からの亀裂の発生

#### 4. ISUMによる逐次崩壊解析

試験体の逐次崩壊解析をFEMおよびISUMを用いて実施した。しかしながら本研究の試験装置の問題点として、治具と試験体のボルト結合部のフランジの剛性が不足したため、試験体の端面に断面平面保持の仮定を満足する強制回転角を作用させることができず、結果として計算結果に比べて試験結果の剛性が弾性範囲から明らかに低い結果となった。そこで、既存の縦曲げ崩壊試験をISUMで解析し、その適用精度を検証する事とした。今後、試験装置を改善し繰り返し載荷過程を含めて数値解析との比較を行う予定である。

ここでは既存のボックスガダーの縦曲げ崩壊試験結果として、Fig.9に示す西原による縦曲げ崩壊試験を取り上げ、その試験結果とISUM解析の結果を比較する。ISUMでは、Fig.9のように載荷梁をチモシェンコ梁要素でモデル化した。試験体部分のモデル化はFig.10に示す通りである。パネルをISUM板要素で、また防撓材を梁・柱要素でモデル化する。試験体部分の長さ方向の要素分割をFig.11に示す。曲げモーメントは、断面平面保

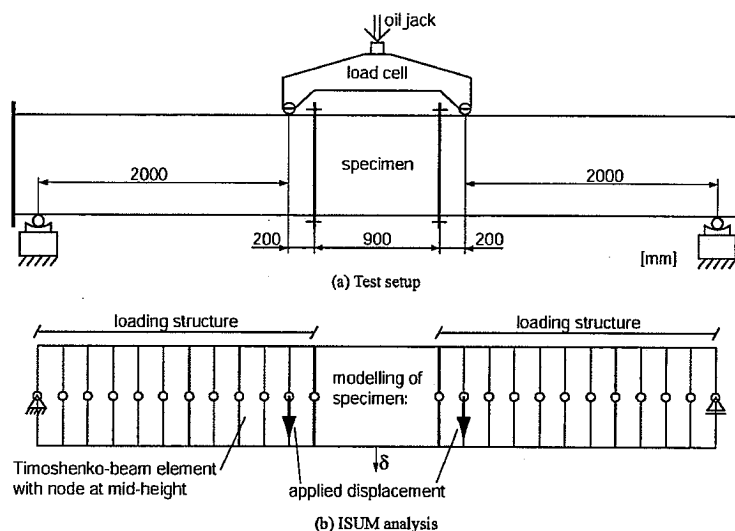


Fig.9 縦曲げ崩壊試験装置とISUMモデル

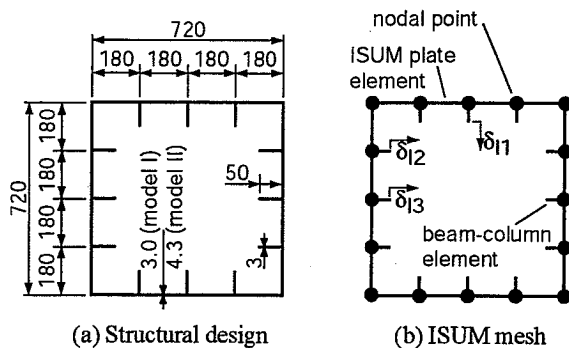


Fig.10 試験体の断面形状とISUMモデル

持の仮定の下に，強制回転角を加えて載荷した。曲げモーメントと全体たわみ $\delta$ の関係を実験と ISUM で比較した結果を Fig.12 に示す。ここでの ISUM 解析では溶接残留応力を考慮していないため，剛性低下の開始時点にやや違いが見られるが，計算結果は実験結果と良好に一致しており，ISUM の有効性が確認された。

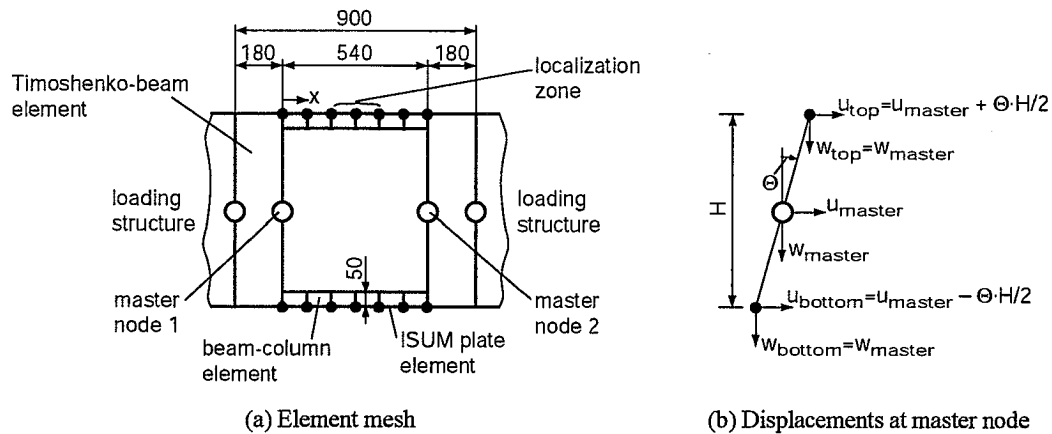


Fig.11 ISUM による縦方向断面のモデル化と境界条件

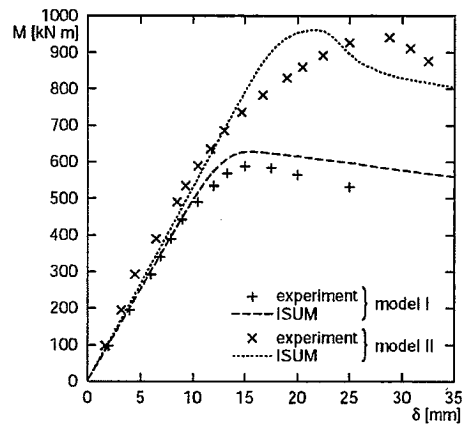


Fig.12 曲げモーメントと全体たわみの関係

【参考文献】 S. Nishihara: Ultimate Longitudinal Strength of Mid-Ship Cross Section, Naval Arch and Ocean Engineering, SNAJ, Vol.22, 1984, pp.220-214.