

ろうと思われます。また、開口量の大きいき裂の先端で微細粒が固体くさびとして有効に作用するためには、粒径、圧迫された時の固まり易さ、き裂面への食いつきの良さ等が重要な因子と考えられますが、いずれにしても更なる検討を要します。

【討論】町田 進 君 くさび効果によるき裂進展効果について、粒径が大きいと効果がなく ( $47.3\ \mu\text{m}$ )、また  $1\ \text{mm}$  位までの初期段階のみ効果があり  $3\ \text{mm}$  を超えると効果なしと述べられていますが、何故そうなのかの議論がないように思います。

【回答】平均粒径の大きい ( $47.3\ \mu\text{m}$ ) アルミナ粒子の場合ですが、本文中にもありますように、油とうまく混ざらず、塗布後も粒子だけで固まってしまうような状態でした。従って、油がき裂内に侵入しても、粒子がうまく輸送されず、効果が無かったものと考えられます。また、そもそも粒径が大きすぎて、発生直後の微小き裂内には侵入できなかった可能性もあります。

き裂進展抑制効果がき裂発生・伝播の初期段階に限定される原因ですが、2つの可能性を考えております。1つは、き裂がある程度成長すると、微細粒の供給が途絶えてしまう（あるいは不足する）という可能性で、これは発生直後に切欠き底近傍で形成された微細粒の固体くさびそれ自体が障壁となって、微細粒の円滑な輸送を阻害してしまう結果と考えられます。もう1つの可能性として、微細粒は十分に供給されていても、き裂成長に伴ってき裂開口量が大きくなり、また先端における塑性変形量も増大することによって、微細粒がき裂面に圧着して固体くさびを形成するのが難しくなるのではないかとこの事が挙げられます。どちらが本当の原因であるかは現在のところ特定できておらず、今後の検討を要するところです。

【討論】小林 昭 君 試験片本数決定の根拠をうかがいたい。

【回答】Table 4 に示すような各シリーズにつき、最低限 Fig. 2 のような線図が描けるよう努めました。利用できる試験片の総数に限りがあり、検証目的の B シリー

ズは2体で、また明らかに進展抑制作用の認められない L シリーズは1体のみで打ち切りました。確率的な議論をしたり、より普遍的な結論を導き出すためには、さらなるデータの蓄積が必要だと考えております。

【討論】武正文 夫 君 (1) 本法による「疲労き裂進展抑制作用は、き裂発生後、伝播過程のごく初期の段階」に顕著とありますが、き裂発生寿命への影響はどの様にお考えでしょうか。例えば、微細粒が繰り返し負荷に伴い流動し、表面を摩耗したため、き裂発生寿命に影響を与えたということは考えられないでしょうか。

(2) また、き裂進展抑制効果のメカニズムについて、微粒子がき裂面に食い込む事によりブリッジングが起き、破面間結合応力が生じたためき裂進展が抑制されたということは考えられないでしょうか。

【回答】(1) 本研究の場合、切欠き内の微細粒は、御指摘の通り、繰り返し負荷に伴って油と共に流動していましたが、繰り返し周波数が  $2\ \text{Hz}$  と低く、この部分の油には物理的に大きな圧力がかかることもありませんので、き裂発生前における微細粒の摩耗作用による影響は小さいと考えております。一方、どの程度の大きさの微小き裂の出現をもってき裂発生寿命とするかは議論のあるところですが、ひとたび微小き裂が発生し、微細粒が入り込めるだけのすき間が生じれば、その影響はすぐに現われると考えられ、そのような場合にはき裂面に対する摩耗作用はくさびの形成に大きく影響すると思われます。

(2) 御指摘の通り、本研究で最も抑制効果の高かったアルミナ粒子（平均粒径  $15.2\ \mu\text{m}$ ）は、母材よりも硬度が高く、形状も比較的角張っておりますので、き裂面への食い込みも良好であったと想像されます。しかし、反面、セラミックス特有の「圧縮には強いが引張りには脆い」という、ブリッジングには不向きな性質もあります。ミクロな領域における、食い込み→破壊、あるいは食い込み→引抜き等の現象が、どの程度き裂進展抑制に効くのかは不明ですが、非常に興味深い問題だと思います。

### 39 簡易力学モデルを用いた防撓パネルの圧壊挙動の解析

【討論】北村 欧 君 (1) 大型船実構造では船幅方向に数十のパネルと縦通肋骨とが配置され且つ、船長方向にも複数のトランス材で連続支持されています。平板ブロックの組立法から考えますと、船幅船長方向の全パネル・肋骨に、不利なモードの初期撓みが連続して存在するとは考え難いのですが、単一防撓パネルによる算定結果から実船構造強度にどう結びつけるのか、目論見を御教示下さい。

(2) 現時点では一様面内圧縮荷重しか考慮できないとありますが、新造時パネル及び縦通肋骨の面外弾性変形量はそれぞれスパンの  $3/1000$ ,  $1/5000$  程度に達する場合があります。近似的ながらこれらを、初期撓みとして重畳して考慮する必要は無いのでしょうか。

【回答】(1) 座屈強度上不利となる初期たわみモードとは、以下のモードを指すと解釈します。

①防撓材の垂直初期たわみと初期振れの方向を、アング

ル型防撓材が垂直曲げを受ける際の曲げ振り変形の方に一致させている。

②防撓材に両端単純支持の座屈モードの初期たわみを与えている。

③パネルの初期たわみとして、周辺単純支持の座屈モードのたわみ成分のみを与えている。

ご指摘のように、これらは基本的に実船構造の下限強度を与える設定になっています。ただし Fig. A に示すように、防撓材の初期捩れの向きが①と逆の場合、および防撓材の初期たわみがトランス材の両側で同じ向きの場合でも、最終強度は上記①、②の初期たわみの場合とほとんど一致しており、最終強度後の耐力にも大差は見られません。また③のパネルの初期たわみについて、著者らの一人は、周辺単純支持矩形板の圧壊解析から、現実の痩せ馬モードの初期のたわみの場合も座屈荷重を越えると座屈モードのたわみ成分のみが成長し、このモードで圧壊することを明らかにしています。これらのことから、本論文の解析により、実船の連続パネルの圧壊挙動が概ね再現されていると考えます。

なお③に関しては、薄板パネルにおいて、ロンジ材を挟む2つのパネルの痩せ馬モードの初期たわみ量がほぼ等しい場合、トランス材近傍で周辺固体に近いモードの局所的な圧壊が生じる場合が明らかになっています。この点については今後さらに検討する予定です。また本研究では単位構造要素について解析しましたが、今後、船幅船長方向に広がる連続パネルについても解析し、既存の実験結果や FEM 解析と比較する予定です。

(2) 船底外板パネル等では、水圧荷重の影響でパネルと防撓材に面外弾性変形が生じます。また、著者らの実船パネルの初期たわみ計測結果によれば、パネルには Fig. B(a) に示す痩せ馬モードの初期たわみの他に、ロンジ溶接線の縦収縮に起因する Fig. B(b)，およびロンジのみ取り付けた段階で生じる同図(c)のような反り変形の存在も明らかになっています。

簡易力学モデルは、現時点では一様面内圧縮しか考慮できませんが、これを板要素に組み込み、さらにその面外変形を考慮することによって、Fig. B(b) のモードの初期変形と全体座屈変形は考慮されています。Fig. B(a) の初期たわみは、簡易力学モデルにおいて考慮しますので、パネル部では、これら2つの初期変形が重畳されています。一方、Fig. B(c) の幅方向の初期変形は考慮できませんが、縦方向圧縮に対しては、このモードの初期変形の影響が小さいことを FEM 解析により確認しています。防撓材の面外変形量は、梁要素において考慮されています。

なお、水圧荷重下では、隣接するすべてのパネルに(a)のモードのたわみが付加され、このたわみ成分は周辺支持モードの座屈たわみの発生に抵抗しますのでパネルの局部座屈強度を上昇させます。一方、たわみ量に応じた曲げ応

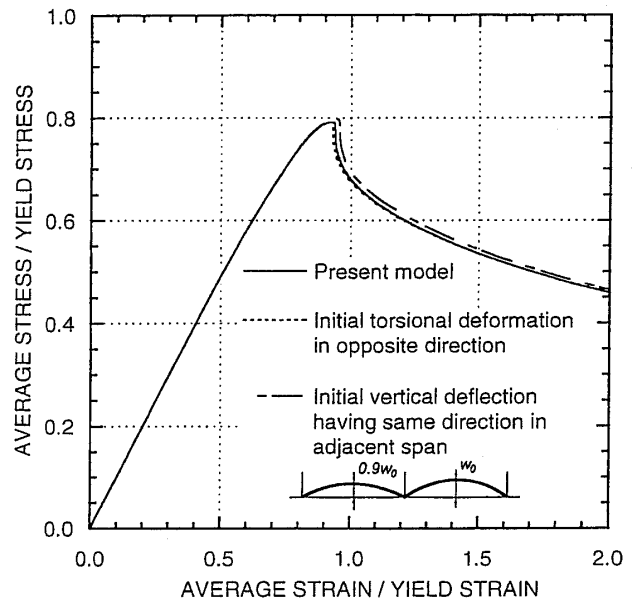


Fig. A Average stress-average strain relationships of a thin plate with stiffener A2

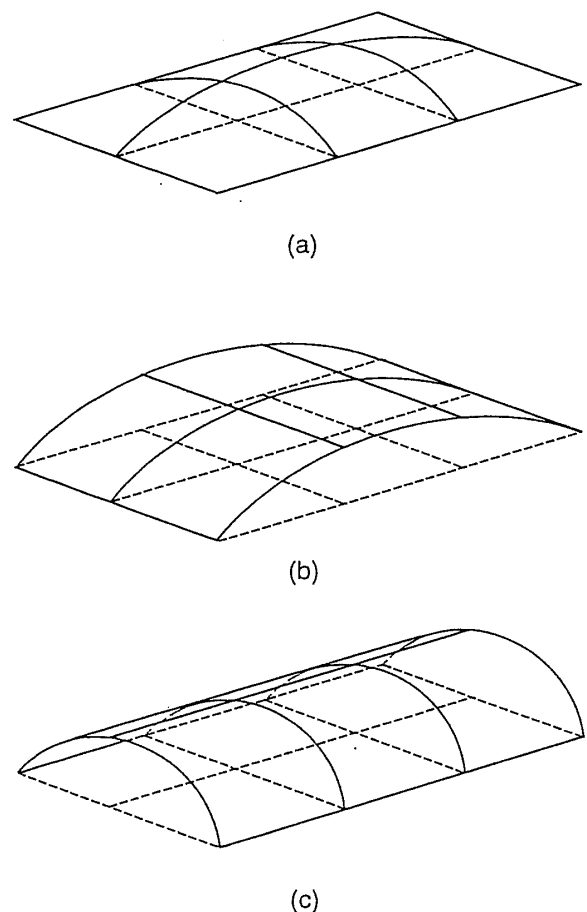


Fig. B Initial deflection of plate

力が発生しますので降伏強度は低下します。現在の板モデルでは、前者は考慮されており、後者は最終強度算式の中に取り込む形で現在定式化を行っています。防撓材の降伏は現モデルで考慮可能です。

【討論】 新田 顕 君 船体構造の最終強度設計を考える場合、防撓板構造物の耐荷力の低下は、著者もご指摘のように、パネルの塑性変形に加うるに防撓材の曲げ捩り塑性変形挙動の把握が重要となります。言うまでもなく、構造物の最終強度即ち“耐荷力の低下の開始”は、いずれかの部材要素で歪除荷を開始することが大きな要因と考えられますので、船体構造を対象とする場合、どの部材のどの部分に“歪除荷”が最初に発生したかを、解析プログラム内で検知しておくことが、解析結果を分析するうえでも、また、設計に際して補強すべき部材の決定にも役立つものと考えられますが、この点についてのご見解をお聞かせ下さい。

【回答】 本論文の解析結果に見られるように、一般に構造物が最終強度に達する場合、高応力部あるいは低強度部から最終強度に達した後、これらの部分に塑性変形が局所化し、その他の部分では崩壊部の耐荷力の低下と共に、除荷が発生する現象が生じます。その意味で、ご指摘のよう

に、最終強度すなわち耐荷力の低下は、いずれかの構造箇所での除荷の発生と極めて密接な関係にあり、解析においても除荷の発生を検知することが、現象を分析する上で非常に重要と考えます。本解析プログラムでは、すべての荷重ステップで除荷の発生をチェックしており、除荷が検知された場合はステップの始めに戻って除荷時の剛性に戻す操作を行っています。今後、より大きな構造対象についても、上記のような変形の局所化と除荷の発生との関係を系統的に明らかにすることが必要と考えています。

一方、構造物あるいは部材のどの部位を補強すべきかに関しては、除荷発生部よりも、塑性変形が局所化する部分に注目する事が重要と考えています。どの部分に塑性変形が集中して最終強度に至らしめるかを、初期不整や構造形状と関係づけて明らかにすることは、最終強度設計では極めて重要であり、今後この点についても検討したいと思います。

#### 40 腐食を考慮した溶接バネモデルに関する研究

【討論】 武市 祥司 君 (1) 7.4 節中の「防撓材の寸法を～、平板の有効幅が2倍となった。その結果、構造全体の座屈強度が1/4に低下した。」の箇所を詳しくご説明願います。

(2) 7.5 節中の「船舶のライフサイクルに亙る～スキャンニングに関する情報」とは具体的には、どのようなことを念頭においておられるのでしょうか、ご教示願います。

【回答】 (1) シミュレーションに用いた構造の防撓材の高さは、防撓材付き平板の座屈モードに影響を及ぼす防撓材と平板の曲げ剛性比に基づき、 $\gamma_{min}$  付近の値を採用しております。従って、STEPOでの構造の座屈強度は、防撓材間のパネル座屈の強度にほぼ等しくなっており、この結果、STEP1へ移行した際に、破断した溶接部の防撓材が構造強度部材として機能しなくなった為、論文中に示した結果が得られたものと考えられます。

(2) 例えば、論文中の6.2節にて示した通り、防撓材の断面寸法が大きな構造が、破断の起こる面外圧力値も高いという結果を得ており、シミュレーションの結果得られた最初に破断する溶接部の防撓材の断面寸法を大きくするというのも、有効な手段の一つであると考えます。

【討論】 濱田 邦裕 君 (1) バネを利用したモデル化について

貴論文の6章や7章で取り扱われている破断や構造崩壊の問題は、溶接バネモデルにバネ定数を与えずに、破断応力のみ与えればシミュレーション可能と考えます。言い換

えれば、溶接部が腐食状況に応じた破断応力を知っていれば、バネとしてモデル化しなくても計算可能ということですね。

バネとしてモデル化することのメリットは、溶接部の変形を想定する場合と考えますが、それはどのような場合と考えられるのでしょうか。

また、文中に（隅肉溶接の場合は）溶接部に加わる応力は剪断応力が支配的であるとされていますが、6自由度のバネを設定した理由は何でしょうか。

(2) 溶接部の微小亀裂の取り扱いについて

溶接部に微小な亀裂があるような構造は、貴研究ではどのようにモデル化されるのでしょうか。バネの配置方法や、バネ定数によって対応可能なのでしょうか。

【回答】 (1) 本研究においては、溶接部を離散化し弾性バネを用いることで構造解析により溶接部に働く応力を算出し、破断を判定しております。また、腐食の状態に応じて、溶接バネモデルのバネ定数を変化させることにより、腐食の状態での溶接部の剛性、強度の低下を表現することが出来たと考えます。こうしたモデル化の結果、論文中には載せておりませんが、構造の座屈応力は腐食の状態に関わらずほぼ一定であり、溶接部が少しでもくっついているならば、構造の座屈に影響を及ぼさないことも分かりました。こうした結果は、本研究で提案した構造崩壊のシナリオの有効性を示すものとして重要なものであり、溶接部を構造要素としての弾性バネでモデル化したメリットの一つと考えております。