面内圧縮荷重を受ける矩形パネルの最終強度後の挙動

正員 矢尾 哲也* 正員 藤久保 昌彦*
 正員 柳 原 大輔* 査 煜 峰**
 村 瀬 知 行**

Post-Ultimate Strength Behaviour of Rectangular Panel under Thrust

by Tetsuya Yao, *Member* Masahiko Fujikubo, *Member*
 Daisuke Yanagihara, *Member* Yufeng Zha,
 Tomoyuki Murase

Summary

In the present paper, post-ultimate strength behaviour of a rectangular panel subjected to uni-axial thrust is discussed based on the results of elastoplastic large deflection analysis by the FEM. It has been found that :

(1) When a panel is accompanied by initial deflection of a buckling mode, deflection of a sinusoidal mode gradually changes to that of a periodical roof mode in the post-ultimate strength range except when the panel is very thick.

(2) When a panel is accompanied by initial deflection of a hungry-horse mode, plastic deformation is concentrated at a certain part of deflection mode, and unloading takes place in the remaining part. Because of this, capacity after the ultimate strength rapidly decreases.

A simple plate element is proposed to simulate the behaviour mentioned in (2), and the calculated results applying the proposed elements show good agreements with those by the FEM. At the end, fundamental idea is described to develop new Idealized Structural Units (ISUM element).

1. はじめに

船体上甲板あるいは船底外板を想定した矩形パネルの圧壊強度に関する研究は、実験および理論の両面から、これまでに数多く実施されている。これは、船体に作用する縦曲げ荷重による甲板構造あるいは船底構造の座屈・塑性崩壊が、主船体の縦曲げ崩壊（折損）に直結すると考えられるためである。

甲板構造あるいは船底構造は、ロンジ材とトランス材で縦横に補強された防撓パネル構造となっているが、過大な縦曲げモーメントが作用した場合、一般には、防撓材間のパネルにまず局部座屈が発生し、このパネルが最終強度に達するような寸法となっている。パネルが最終強度に達し

ても、防撓材はまだ耐力を有しており、防撓パネル全体としてはさらに荷重増加に耐えるが、やがて全体としても最終強度に達する。

この場合、局部崩壊して最終強度に達した後のパネルの挙動が、防撓パネルが全体としての最終強度にいつ到達するかに影響することになる。従って、防撓パネルの全体崩壊強度を求めようとする場合、局部崩壊して最終強度に達したパネルの、最終強度後の耐力を明らかにすることが重要となる。

著者らは防撓パネルの圧壊挙動に関するこれまでの研究で、最終強度に達した後は塑性変形が局部に集中し、それ以外の箇所では耐力の低下と共に、除荷が発生する傾向のあることを見い出している^{1,2,3)}。本論文では、この問題の基本的な特徴を明らかにするために、防撓材で仕切られた局部パネルを対象として、その最終強度後の挙動を明らかにする。

具体的には、縦肋骨方式の船体上甲板を想定し、長辺方向に面内圧縮荷重が作用する細長矩形パネルを対象とす

* 広島大学工学部

** 広島大学大学院工学研究科

る。まず、座屈モードの初期たわみおよび実測結果に基づく瘦せ馬モードの初期たわみを与え、有限要素法による一連の弾塑性大たわみ解析を、周辺単純支持の条件で実施する。つぎに、その結果に基づいて、最終強度後に発生する塑性変形の局所化と除荷の問題に対して考察を加える。そして、このような崩壊挙動の再現を試みるために、簡易力学モデルを組み込んだ板要素を開発し、解析を実施する。最後に、船体構造の座屈・塑性崩壊解析に対する本要素の適用性について、理想化構造要素法の観点から考察を加える。

2. 解析対象および境界条件

本論文では、過去に初期たわみの計測を実施した船体上甲板^{4,5)}の中から代表的なパネル18枚を選び、解析の対象とした。矩形パネルの初期たわみは、一般に次式で近似できる。

$$w_0 = \sum_{i=1}^n A_{0i} \sin \frac{i\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (1)$$

対象とした18枚のパネルの初期たわみの最大値およびたわみ成分の係数を、パネルの寸法と共にTable 1に示す。これらの初期たわみ成分を式(1)に代入すると、瘦せ馬モードの初期たわみが得られる。

対象とするパネルは連続防撓パネルの一部であり、パネルの4辺に沿って防撓材が取り付けられている。この防撓材の影響で、パネルの座屈強度は周辺が単純支持されている場合よりも上昇する¹⁾。しかしながら、ここでは基本的な場合に対して考察を加えることを目的としているので、問題を単純化してパネルはその周辺が単純支持されているとする。

長辺方向の面内圧縮力は一様な強制変位を介して負荷

し、荷重に平行な辺は、パネルの連続性を考慮して、直線を保ちながら変位するとした。このような境界条件を設定して、有限要素法による弾塑性大たわみ解析を実施した。

まず初めに、各パネルに対してTable 1に示す初期たわみを与えて解析を行った。続いて、Table 1に示すたわみ成分の中で、周辺単純支持の座屈モードに対応するたわみ成分だけがあるとした場合に対しても、解析を実施した。

周辺単純支持の厚板の最小座屈値を与える座屈1半波のアスペクト比は、0.7となる⁶⁾。厳密にこの条件を満足するのは、5半波モードで座屈する場合のNo.10とNo.11パネルだけである。他のパネルについては、座屈1半波部分のアスペクト比が、できるだけ0.7に近くなる半波数の座屈モードを選んだ。

想定した各パネルの座屈モードは、弾性座屈する場合も含めて、つぎのようになる。

No. 01~No. 04: 4半波モード

No. 05~No. 07: 7半波モード

No. 08~No. 09; No. 12~No. 14: 3半波モード

No. 10~No. 11; No. 15~No. 18: 5半波モード

弾塑性大たわみ解析には、著者らのグループで開発された解析コードULSASのPlate Versionを使用した。本解析コードは、超大変形領域まで高精度の解析が可能な計算アルゴリズム⁷⁾に従っている。これまでに、ISSCのベンチマーク問題を含む数多くの問題に適用されて、解析結果の精度は十分に確認されている。

解析に当たっては、幅方向に10分割、長さ方向には1次高次のモードの座屈1半波を10分割する要素分割を、基準としている。

各パネルとも材料はHT 32であり、降伏応力は $\sigma_Y = 313.6 \text{ MPa}$ とした。また、加工硬化率ゼロの完全弾塑性体

Table 1 Coefficients of measured initial deflection

No.	w_{0max}	A_{01}	A_{02}	A_{03}	A_{04}	A_{05}	A_{06}	A_{07}	A_{08}	A_{09}	A_{010}	A_{011}
01	0.7859	0.7463	0.0257	0.1240	-0.0008	0.0656	0.0229	-0.1117	-0.0159	-0.0162	-0.0647	0.0077
02	1.2970	1.3460	0.0902	0.2236	0.0363	0.0868	0.0816	-0.1024	0.0361	0.0138	-0.0256	0.0276
03	1.5262	1.2350	0.3393	0.3435	-0.1293	0.0609	0.0148	0.0310	0.0310	0.0333	-0.0747	0.0185
04	1.6301	1.2392	-0.4825	0.2680	-0.0495	-0.0286	0.0286	0.0459	-0.1104	-0.0562	-0.0043	0.0077
05	-0.4163	-0.3543	-0.0972	0.0051	0.0433	0.0316	0.0169	0.0938	0.0183	0.0485	0.0324	0.0232
06	0.4624	0.3520	-0.1582	0.0950	0.0065	0.0973	-0.0135	0.0713	-0.0122	0.0555	0.0081	0.0281
07	0.6548	0.4787	-0.0400	0.1955	0.0585	0.1073	-0.0214	0.1294	0.0260	0.0985	0.0285	0.0897
08	3.0083	3.0924	-0.3364	0.3619	-0.0562	-0.0166	-0.0762	0.0099	-0.0584	-0.0598	-0.0300	0.0132
09	3.3261	3.6868	0.0492	0.7494	0.0545	0.3818	0.0155	0.1419	-0.0485	-0.0413	0.0134	0.0916
10	3.1418	3.3394	0.1875	0.2967	-0.0595	0.1944	-0.1278	0.1433	-0.0299	0.0699	-0.0135	0.0421
11	3.8194	4.1613	-0.4340	0.9214	0.0133	0.5593	0.0151	0.2425	-0.0042	0.0833	0.0216	0.0935
12	2.4127	2.6681	-0.2861	0.6864	-0.0967	0.5339	0.0076	0.2338	-0.0584	0.1050	-0.0444	0.0730
13	3.7661	3.9553	0.2182	1.2040	0.0949	0.3592	0.0248	-0.0228	0.0803	-0.1374	-0.0163	-0.0153
14	4.1092	4.5350	0.1825	1.4192	-0.3868	0.6556	-0.1380	0.3410	-0.04289	0.1547	-0.0919	0.1354
15	3.0660	1.8620	0.3439	1.0984	0.3603	0.5491	0.2338	0.1545	0.0026	0.1640	-0.0081	-0.0597
16	3.3584	2.7932	-0.7274	0.9647	0.1594	0.7269	-0.1866	0.1623	0.3599	0.2548	0.1927	0.0336
17	3.8388	3.5429	0.1604	1.5268	0.0882	0.7295	0.1600	0.3718	0.1658	0.0716	0.0383	0.0391
18	3.8267	4.5272	-0.0463	1.1956	0.0386	0.6717	0.0967	0.2407	0.0345	0.0554	-0.0024	-0.0092

(in mm)

No.01~04: $a \times b \times t = 2,400 \times 800 \times 34.5 \text{ mm}$

No.05~07: $a \times b \times t = 4,200 \times 835 \times 22 \text{ mm}$

No.08~09: $a \times b \times t = 2,100 \times 800 \times 19 \text{ mm}$

No.10~11: $a \times b \times t = 2,800 \times 800 \times 19 \text{ mm}$

No.12~14: $a \times b \times t = 2,400 \times 835 \times 15 \text{ mm}$

No.15~18: $a \times b \times t = 4,200 \times 835 \times 13 \text{ mm}$

を仮定し、材料のヤング率は $E=205.8 \text{ GPa}$ とした。

3. 矩形パネルの圧壊挙動

3.1 薄板の座屈・塑性崩壊挙動

薄板の代表例として、No. 18 パネルの変形と降伏領域の変化を、Fig. 1 および Fig. 2 に示す。前者は座屈モードの初期たわみを、また、後者は実測された痩せ馬モードの初期たわみを与えた場合の結果を表す。変形図の横たわみは、6倍して表示している。降伏状態を表す図では、要素内の横線が裏面からの、また、縦線は表面からの降伏を表しており、線の本数が降伏した層の数を表す。縦線と横線で塗りつぶされている要素は、全層が降伏していることになる。さらに、これら両ケースの平均圧縮応力と平均圧縮ひずみの関係を比較して Fig. 3(a) に、平均圧縮応力と横たわみの関係を比較して Fig. 3(b) に示す。

まず、座屈モードの初期たわみを与えた Fig. 1 の場合には、圧縮荷重が座屈荷重近傍に達すると横たわみが増加し始め、やがて降伏が始まり最終強度に達する。その後も座屈モードのたわみは成長を続けるが、次第に正弦波モードから屋根型の塑性崩壊モードに変化して行く。この場合は、同一の変形モードが5個直列に並んだ崩壊モードとなっており、Fig. 3 に点線で示されているように、最終強度後の耐力低下は緩やかである。

一方、痩せ馬モードの初期たわみを与えた Fig. 2 の場合には、座屈モード以外の初期たわみ成分もあるために、座屈モードのたわみの成長が妨げられる。その結果、Fig. 3(b) に示されているように、座屈荷重 ($\sigma_{cr}/\sigma_Y=0.5751$) のごく近傍に達してから座屈モードのたわみが急増し始める。この時点では座屈モード以外のたわみ成分も存在している。その後、座屈モード以外のたわみ成分は減少して行くが、最終強度に達した時点でもまだ残留している⁴⁾。そのために、たわみゼロの面を基準とした半波の長さは、Fig. 2(b) に示されているように不均一となっており、降伏領域も Fig. 1 に示した座屈モードの初期たわみを有する場合と比較すると、長さ方向に規則的には分布していない。

Fig. 4 に、長さ方向の各座屈半波部分ごとに求めた平均圧縮応力～平均圧縮ひずみ関係を示す。座屈モードの初期たわみを与えた場合には5つの断面が同時に最終強度に達したのに対して、痩せ馬モードの初期たわみを与えた場合には、最も降伏が進行していた左端のA部分のみがまず最終強度に達する。この時点で、左端から2つ目のB部分もほぼ最終強度に達しているが、他の部分ではまだ最終強度に達していない。そして、左端のA部分の耐力が最終強度後低下する段階で、図にも示されているように、A以外の部分では応力もひずみも減少し始める。すなわち、除荷が発生する。このことは、Fig. 2 に示されている降伏領域の変

Fig. 1 Change in deflection mode and yielded zone of thin rectangular panel under thrust (No. 18; Initial deflection in buckling mode)

Fig. 2 Change in deflection mode and yielded zone of thin rectangular panel under thrust (No. 18; Initial deflection in hungry-horse mode)

(a) Average stress-average strain relationships

(b) Average stress-deflection relationships

Fig. 3 Comparison of collapse behaviour between thin panels with initial deflection in hungry-horse mode and buckling mode (No. 18)

化からも明らかである。しかしながら、B 部分では完全に弾性状態へ戻ることはなく、A 部分の波長が短くなるに従って A 部分に隣接する部分で降伏が進み、再び圧縮ひずみが増加し始める。

これら 5 つの部分のひずみを平均したものとして全体の平均ひずみが得られる。その結果、痩せ馬モードの初期たわみを与えた場合のパネル全長に渡る平均ひずみは、座屈モードの初期たわみを与えた場合と比較すると小さくなる。Fig. 3(a) に示されているように、痩せ馬モードの初期たわみを与えた場合の最終強度後の耐力が急減しているのは、除荷した部分の圧縮ひずみの減少が原因である。

3.2 厚板の座屈・塑性崩壊挙動

つぎに、No. 03 のパネルを例に取り、厚板の座屈・塑性崩壊挙動について説明する。座屈モードの初期たわみを有する場合、および痩せ馬モードの初期たわみを有する場合の変形と降伏領域の変化を、Fig. 5 および Fig. 6 にそれぞれ示す。また、両者の平均応力～平均ひずみ関係と平均応力～たわみ関係を比較して、Fig. 7(a) および (b) に示す。

このパネルは塑性座屈する寸法を有しており、4 半波の座屈が生じる場合の座屈ひずみは、塑性変形理論に従った解析⁹⁾の結果によると $\epsilon_{cr}/\epsilon_Y = 4.0241$ となる。

まず、座屈モードの初期たわみを与えた場合には、最終強度に達した後 Fig. 7(a) に示されているように、初期たわみの影響で応力は次第に低下し始める。やがて、平均圧縮ひずみが座屈ひずみを越える近傍から、座屈モードのたわみが増加し始める。すなわち、この場合の座屈ひずみに対応する応力は $\sigma/\sigma_Y = 0.9715$ となるが、Fig. 7(b) の点線で表されているたわみは、この応力値近傍から成長し始めている。この状態は、平均圧縮ひずみが降伏ひずみの約 13 倍 ($\epsilon/\epsilon_Y = 13.0$) に達するまで続く。この間、4 半波の正弦波

Fig. 4 Average stress-average strain relationships in individual buckling half waves of thin panel (No. 18)

モードは次第に屋根型の塑性崩壊モードに変化して行く。しかしながら、Fig. 5 に示されているように、やがて塑性変形が左端の 1 半波部分にのみ集中し、他の部分では除荷が始まって耐力が大きく低下し始める。

この塑性変形の局所化は、4 半波モードの 1 半波部分のアスペクト比が 0.75 であるのに対して、最小の塑性座屈ひずみを与える 1 半波のアスペクト比は 0.7 であり、この波長の座屈モードに部分的にでも移行しようとしたことが一因とも考えられる。しかしながら、パネルの長さを 2,240 mm として、座屈 1 半波のアスペクト比が 0.7 となるパネルに対しても別途解析を実施したが、同様の結果が得られた。さらに、要素分割を細かくした解析も実施したが、同

Fig. 5 Change in deflection mode and yielded zone of thick rectangular panel under thrust (No. 03; Initial deflection in buckling mode)

Fig. 6 Change in deflection mode and yielded zone of thick rectangular panel under thrust (No. 03; initial deflection in hungry-horse mode)

(a) Average stress-average strain relationships

(b) Average stress-deflection relationships

Fig. 7 Comparison of collapse behaviour between thick panels with initial deflection in hungry-horse mode and buckling mode (No. 03)

じ結果となった。また、ここで対象としている現象は、完全弾塑性体のパネルのほぼ全域が降伏し、しかも平均圧縮ひずみが降伏ひずみの13倍にまで達している極めて不安定な状態であり、数値計算上の誤差に敏感であることも予想されるので、 $E/65$ の加工硬化率を与えた解析も実施したが、やはり同じ結果が得られた。現時点では、この場合の

塑性変形の局所化の原因は明らかでなく、今後の検討を待ちたい。

なお、同じく塑性座屈が発生するNo. 05～No. 12パネルでは、座屈モードに対応する初期たわみを与えた場合、後出のFig. 8に示すように、このような変形の局所化は見られなかった。

Fig. 8 Collapsed modes of rectangular panels under thrust beyond ultimate strength

つぎに、痩せ馬モードの初期たわみを与えた場合には、初期たわみ波形の影響で最終強度後3半波モードのたわみが成長する。やがて、塑性変形が中央の半波部分に集中し始め、耐力は大きく低下する。この耐力の低下は、変形が集中した中央部以外の部分で除荷が発生したためである。この現象は、基本的には薄板の場合と同じである。

3.3 面内圧縮荷重を受ける矩形パネルの最終強度後の挙動

代表的なパネルの最終計算ステップでの崩壊モードをまとめて、Fig. 8に示す。座屈モードの初期たわみを有する場合には、極厚板のNo. 01～04のパネルを除き、いずれのパネルでも規則的な屋根型モードの塑性崩壊が発生している。ただし、No. 06のパネルでのみ、2つの半波部分で除荷が発生し始めている。他のパネルでは、ここで解析を行った圧縮ひずみの範囲内では、このような除荷は起こらなかった。

一方、痩せ馬モードの初期たわみを与えた場合には、最終強度後に塑性変形がひとつの半波部分に集中し、他の部

分では除荷が発生する。変形が集中する箇所は、多くの場合端部となるが、パネル中央などの他の部分に塑性変形が集中する場合もある。ここに示されていないパネルでは、No. 01はNo. 04と、No. 02はNo. 03と、No. 07はNo. 05と、No. 09はNo. 08と、No. 10はNo. 11と、また、No. 13とNo. 14はNo. 12とそれぞれ同様の崩壊モードとなる。

4. 簡易計算モデルによる崩壊挙動の再現

4.1 簡易力学モデルを組み込んだ板要素

上記のような塑性変形の局所化と除荷の現象は、部材レベルであれば有限要素法を適用して手軽に再現できる。対象が大きな構造物になっても、有限要素法を直接適用することは原理的には可能であり、事実適用された例も見られる。しかしながら、一般には計算の手数と費用の関係で、大型構造物全体に対して有限要素法による崩壊解析を実施することは困難である。

そこで、理想化構造要素法などの、効率的で高精度の解

を与える解析手法が開発されている。この方法では、例えば防撓材で囲まれた1枚の矩形パネル、あるいは数本の防撓材を有する防撓パネルをひとつの要素とする。ここでは、本論文で対象としている矩形パネル要素について考える。

この要素の長辺方向に面内圧縮荷重が作用する場合、従来の理想化構造要素では、最終強度後も座屈モードに対応する半波数の規則的な変形モードが成長すると考え、一枚のパネルをひとつの理想化構造要素でモデル化している。しかしながら、前章で示したように、このような変形が生じるのは座屈モードの初期たわみがある場合だけである。実構造中の細長パネルは、通常は痩せ馬モードの初期たわみを有しており、初期たわみが座屈モードであることはない。

従って、最終強度に達した後に生じる塑性変形の局所化と、広範に生じる除荷を考慮できるモデル化が必要となる。ここでは、著者らが開発したパネルの簡易解析モデル⁸⁾を適用する板要素を開発し、塑性変形の局所化と除荷を伴う崩壊挙動の再現を試みた。

本モデルは、弾性たわみ解析と剛塑性機構解析の解析解を組み合わせ、面内の引張/圧縮の繰返し荷重を受ける矩形パネルの崩壊挙動を再現できる簡易モデルで、その力学的特性は平均応力～平均ひずみ関係で表される。このモデルを用いて、座屈と降伏を伴う複雑な崩壊挙動が、精度良く再現できる。

ここでは、座屈モード1半波部分をひとつの板要素で表し、これを直列につないで一枚のパネルを表す。Fig. 9に、モデル化の例を示す。開発した板要素は、双1次の面内変位場を仮定したアイソパラメトリック四辺形要素で、次式で表される剛性行列を有している。すなわち、

$$[K] = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (2)$$

ここに、 $[B]$ は要素のひずみと節点変位を関係付けるマトリックスを表し、 $[D]$ は次式で表せる。

$$[D] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ただし、材料は上記の簡易解析モデルの平均応力～平均ひずみ関係に従って挙動するものとする。すなわち、式(3)のヤング率 E として、平均応力～平均ひずみ線図上の現時

Fig. 9 Element representation of rectangular panel

点のひずみ値に対応した点における接線係数を用いる。

この要素を用いることにより、1半波部分に生じる座屈と降伏の影響を自動的に考慮した解析が可能となる。ただし、現時点では本要素で考慮できる荷重は、一方向の一樣面内荷重のみである。

4.2 新しい板要素を用いた計算とその結果の考察

前節で説明した板要素を適用して、No. 01～No. 18 パネルの解析を実施した。解析に際しては、パネルを先の有限要素法解析で想定した座屈モードの半波数の板要素に分割した。座屈変形の局所化を表現するために、その中のひとつの要素の初期たわみを Table 1 に示されている座屈半波成分の値とし、他の要素はこの半分の大きさの初期たわみを有するとする。どの要素を選んでも、得られる結果は同じとなる。

まず初めに、一例として No. 15 パネルの場合を選び、各板要素が辿った平均圧縮応力～平均圧縮ひずみ関係を、Fig. 10 に示す。図の破線は、Table 1 に示す初期たわみを有する要素1の応力～ひずみ関係を、また、点線はその半分の大きさの初期たわみを有する要素2～5の応力～ひずみ関係を表す。図より明らかなように、要素1が最終強度に達した後、他の要素では除荷が発生し、基本的には通常の有限要素法解析で得られたのと同様の座屈・塑性崩壊挙動が再現できていることがわかる。この場合のパネル全体としての平均応力～平均ひずみ関係は、図中の実線となる。

Table 1 に示す各グループから代表例として、No. 15 パネルの他に No. 03, No. 07, No. 09, No. 10 および No. 13 パネルを選び、新しい板要素を用いて計算した結果を痩せ馬モードの初期たわみを与えた有限要素法解析の結果と比較して、Fig. 11(a)～(f) に示す。図中の実線は通常の有限要素法解析の結果、点線が新しい板要素を用いた計算結果を表す。また、一点鎖線はすべての要素に Table 1 の座屈半波成分と同じ大きさの初期たわみを与えた場合の結果を

Fig. 10 Average stress-average strain relationships in individual elements (No. 15)

Fig. 11 Comparison of average stress-average strain relationships obtained by using new elements and FEM

表す。

Fig. 11 を見ると、新しい板要素を用いた解析の結果（点線）は有限要素法解析の結果（実線）と、No. 08 以降の薄板パネルで、基本的には良い一致を示していることが分かる。これらの結果は、塑性変形の局所化とそれに伴う除荷の影響を考えない場合の結果（一点鎖線）とかなり異なっており、局所化と除荷の影響を考慮しない解析では、最終強度後の耐力の急減を再現できないことが分かる。

比較的厚板の No. 07 パネルでは、耐力が大きく低下し始める時点が異なっている。この原因として、簡易力学モデルにおける簡易化手法に問題があると考えられる。厚板の塑性座屈に伴うこの問題に関しては、今後検討する予定である。

Fig. 11 に示していない他のケースでも、比較的厚板の No. 05～No. 07 パネルを除いて、新しい板要素を用いた計算結果は、有限要素法解析の結果と、基本的には良い相関を示している。

4.3 新しい理想化構造要素の開発

本論文で提案した板要素は、現時点では前述のように、一方向に一樣な面内荷重が作用する場合に対してのみ有効な要素であるが、理想化構造要素のひとつとして位置付けられる。船体構造解析で本要素が適用可能な問題は、連続防撓パネルとしての船体上甲板構造や船底外板構造の圧壊挙動の解析、あるいは船体横断面の縦曲げ逐次崩壊解析な

どに限られる。しかしながら、これらの問題は主船体構造の折損に直結する問題であるので、船体構造の安全性を考える上で極めて重要である。

現在、振れやフランジの水平曲げも精度良く取り扱える防撓材要素を開発中であり、本論文で提案した板要素と組み合わせ、上記の問題に関する逐次崩壊解析を実施すべく研究を進めている。

一方、本要素をより一般的な理想化構造要素として発展させるためには、任意の荷重が作用する場合に対して適用可能なように拡張する必要がある。具体的に考慮すべき荷重としては、2 方向面内荷重＋剪断荷重＋2 方向曲げ荷重＋水圧荷重の組み合わせ荷重が考えられる。これらの荷重の中で、塑性変形の局所化を生じさせるのは、矩形パネルの長辺方向に作用する面内圧縮荷重および曲げ荷重のみである。

これらの荷重が主たる作用荷重である場合には、短辺方向の一樣面内荷重や水圧荷重は、長辺方向の平均応力～平均ひずみ関係に影響する因子として、その影響を定式化することは可能と考えられ、現在検討中である。また、面内剪断力の影響に関しては、座屈応力と降伏応力を修正する形で、その影響を近似的に考慮できる⁹⁾。あるいは要素剛性マトリックスの剪断剛性に関係した項に、剪断による座屈と降伏の影響を導入することも考えられる。

これに対して、前記の組み合わせ荷重が任意に作用する

場合に対しては、上田ら^{10,11)}の定式化から出発し、これに塑性変形の局所化と除荷の影響を取り入れる方向での要素開発も考えられる。

理想的には後者の手法が望ましいが、定式化がかなり複雑になる恐れもある。問題に応じては、本論文で提案した単純な理想化構造要素も、十分に有用であると考えられる。

5. ま と め

本論文では、一方向に面内圧縮荷重を受ける矩形パネルを対象として、その最終強度後の挙動を明らかにした。まず、初期たわみ波形が実測されている 18 枚のパネルに対して、有限要素法による弾塑性大たわみ解析を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 初期たわみが座屈モードである場合、最終強度後のたわみは、規則的な正弦波モードから規則的な屋根型モードへと変化して行く。極厚板では、塑性変形がやがてひとつの半波部分に集中して行く場合もある。
- (2) 初期たわみが痩せ馬モードである場合、始めは座屈モードの変形が生じるが、最終強度に達した後、やがて塑性変形がいずれかの半波部分に集中し始める。その結果、塑性変形が集中した部分以外の場所では除荷が発生する。この除荷のために、パネル全体としての平均圧縮ひずみの増加が(1)の場合と比べて減少し、最終強度後の耐力が急減する。

上記(2)の挙動を再現するために、簡易解析モデルを適用した板要素を開発した。本要素を用いた計算結果は、前記の有限要素法解析の結果と、一部の厚板の場合を除き良い一致を示した。

最後に、本要素の船体構造解析への適用性について、理想化構造要素法の観点から考察を加えた。今後、本要素を現在開発中の防撓材要素と組み合わせて、船体の縦曲げ逐次崩壊解析に適用する予定である。

参 考 文 献

- 1) 矢尾哲也, 藤久保昌彦, 柳原大輔, 大野禎久: “防撓パネルの圧壊強度に関する研究(第1報),” 日本造船学会論文集, 第178号(1995), pp. 451-462.
- 2) 矢尾哲也, 藤久保昌彦, 柳原大輔: “面内圧縮荷重を受ける連続防撓パネルの座屈・塑性崩壊挙動に関する研究,” 西部造船会会報, 第92号(1996), pp. 263-274.
- 3) 矢尾哲也, 藤久保昌彦, 柳原大輔, 久間康充: “防撓パネルの圧壊強度に関する研究(第2報),” 日本造船学会論文集, 第180号(1996), pp. 435-446.
- 4) 上田幸雄, 矢尾哲也, 中長啓治, 田中義照, 半田和久: “溶接初期不整を有する矩形板の圧壊強度に関する研究(第3報)―複雑な初期たわみを有する矩形板の圧壊強度の推定法―,” 日本造船学会論文集, 第154号(1983), pp. 345-355.
- 5) Yao, T., Nikolov, P. I. and Miyagawa Y.: “Influence of Welding Imperfections on Stiffness of Rectangular Plate under Thrust,” Mechanical Effects of Welding, (Eds.) Karlsson, L., Lindgren, L. -E. and Jonsson, M., Springer-Verlag (1992), pp. 261-268.
- 6) Ueda, Y.: “Elastic, Elastic-Plastic and Plastic Buckling of Plates with Residual Stresses,” Ph. D Dissertation, Lehigh University (1962).
- 7) 都井 裕, 弓削康平, 川井忠彦: “構造要素の衝突圧壊強度に関する基礎的研究(その1)―有限要素法による超大変形解析―,” 日本造船学会論文集, 第159号(1986), pp. 248-257.
- 8) 矢尾哲也, 藤久保昌彦, Nie Chun, 上山誠司: “板の圧壊挙動を表す簡易解析モデルの開発とその応用,” 日本造船学会論文集, 第178号(1995), pp. 439-449.
- 9) ナホトカ号事故原因調査委員会: ナホトカ号事故原因調査報告書(1997), pp. 112-113.
- 10) 上田幸雄, 梅本勝弥, 正岡孝治: “塑性節点法による梁柱, および矩形板の弾塑性大たわみ解析,” 日本造船学会論文集, 第171号(1992), pp. 319-328.
- 11) 上田幸雄, 正岡孝治: “固有関数を用いた薄板構造物の弾塑性解析法(第2報初期不整量を考慮した矩形板要素),” 日本造船学会論文集, 第178号(1995), pp. 463-471.