- 短辺方向荷重を受ける場合の崩壊挙動の再現-

彦** 也 正員 石 橋 公 久 保 昌 下昌 藤 正員 矢 尾 哲 也

Development of ISUM Element for Rectangular Plate with Cutout

by Kinya Ishibashi, Member Masahiko Fujikubo, Member Tetsuya Yao, Member

Summary

The Idealised Structural Unit Method (ISUM) is known as a simple but efficient method to simulate buckling/plastic collapse behaviour of structural systems. To perform collapse analysis of structures composed of girder webs and plate flanges such as a ship's double bottom structure, it is necessary to develop a new ISUM element which can simulate buckling collapse behaviour of a girder web with a cutout. In the present paper, a series of collapse analyses with conventional FEM is firstly performed changing the size, the shape and the location of a cutout. On the basis of the results of FEM analyses, a new ISUM element which can simulate the buckling collapse behaviours of a rectangular plate with a cutout subjected to thrust in the transverse direction is developed. Through comparison of the calculated results with those by FEM analysis, the applicability and the accuracy of the new ISUM plate element are demonstrated.

1. 緒 言

大規模な構造の崩壊挙動を解析する手法として、理想化構 造要素法が、上田らによって提案されている¹⁾。ISUM の要 素は、材料的及び幾何学的非線形性を理想化し、その要素内 で再現できるよう定式化されているため、通常の FEM に用 いられる要素よりも遥かに大きな要素で構造の崩壊挙動を 精度よく追跡することができる。従って、解析対象となる構 造体を少ない要素数でモデル化し、自由度数を減らせること から、通常の FEM による崩壊解析よりも遥かに少ない計算 時間で解析を実施することが可能となる。

ISUM は、現在でも適用性及び精度を向上させるための研 究が進められている。例えば、藤久保、Kaeding らは新しい ISUM 要素²⁾³⁾を提案し、その ISUM 要素を用いて、二軸圧 縮及び横圧を受ける連続防撓パネルの崩壊解析 6)8)9)及び縦 曲げモーメントを受ける船体梁の崩壊解析 ^のを実施し、また、 FEM 解析との比較によりそれらの解析精度の確認を行った。 また、さらなる ISUM の活用例として、船の二重底構造のよ うなフランジプレートとウェブプレートから構成される構 造の崩壊解析が実施された 5。しかしながら、当解析では、

(財)日本海事協会技術研究所
 ** 広島大学大学院工学研究科
 *** 大阪大学大学院工学研究科
 原稿受理 平成18年2月28日

フロア或いはガーダーなどのウェブプレートを弾塑性梁要 素によってモデル化しているため、ウェブプレートの座屈が 考慮できない。解析の精度を高めるためには、弾塑性梁要素 に代わって、ウェブプレートの座屈塑性崩壊を再現できる新 しい ISUM 要素を開発する必要がある。また、フロア及びガ ーダーは、軸方向荷重だけでなく、曲げ荷重或いは剪断荷重 の組み合わせ荷重を受け、さらに、一般に通行用或いはパイ プを通すための開口を有しており、新しい ISUM 要素はこれ らの影響を考慮する必要がある。

そこで、本研究では、先ず有孔パネルに短辺方向圧縮荷重 が働く場合の崩壊挙動に焦点を当て、その崩壊挙動を表すこ とのできる ISUM 要素の開発を行った。開発に際しては、非 線形 FEM を用いて、パネルアスペクト比、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 析のシリーズ計算を実施し、解析結果から有孔パネルの座屈 崩壊挙動に関する知見を得た。次に、この知見に基づき新し い ISUM 要素の提案を行った。

2. 弾塑性大撓み解析によるシリーズ計算

2.1 解析モデル及び解析条件

短辺方向圧縮荷重下での矩形有孔パネルの崩壊挙動を調

べることを目的として、4種の異なる板厚(t=12mm, 16mm, 20mm, 24mm)のパネルに対して Table 1 に示すアスペクト 比(短辺長さ 1000mm)、開口の形状、面積及び位置を変化さ せた計 64 個のモデルを用いてシリーズ計算を行った。なお、 計算に用いたモデルの開口の大きさは、実際の桁パネルに設 けられる開口の範囲を十分にカバーしていると考えられる。

本解析には、商用解析コードである MSC.Marc を用いた。 Fig.1 に示すとおり、境界条件は4辺単純支持とし、実構造 においてパネルが連続している条件を満たすため、4辺が直 線を保持する条件をモデルに与えた。初期撓みは、撓み量を 板厚の 10%とし、基本座屈モードの形状で与えた。材料特 性は、ヤング率 E=210.0GPa、降伏応力 $\sigma_{\rm Y}$ =315N/mm²とし、 加工硬化率 H'=0 の完全弾塑性体とした。



Fig.1 Model of Rectangular plate panel with cutout under transverse compression (As2Cir400,t=12mm)

Model	Aspect ratio	Cutout size and shape	Cutout position	
As3Nohole	3	without	N/A	
As2Nohole	2	cutout		
As3Cir800	3	Circle	Center of panel	
As2Cir800	2	d=800mm		
As3Cir400	3	Circle		
As2Cir400	2	d=400mm		
As3Cir200	3	Circle		
As2Cir200	2	d=200mm		
As3Off1000	3		shifted with 1000mm in x-dir. from center of panel	
As3Off500	3	Circle	shifted with 500mm in x-dir. from center of panel	
As2Off500	2	d=800mm		
As2Off250	2		shifted with 250mm in x-dir. from center of panel	
As3Oval1000	3	Oval		
As2Oval1000	2	1000x800 mm	Center of popel	
As3Oval1200	3	Oval	Center of panel	
As2Oval1200	2	1200x800 mm		

Table 1 Calculated models

2.2 解析結果及び考察

開口無し矩形パネル(As3Nohole,t=12mm)に圧縮荷重を加 えた場合の解析結果を Fig.2 及び3に示す。Fig.3は3つの載 荷段階における矩形パネルの変形を表し、Fig.2(a)及び(b)は、 それぞれ平均応力-平均ひずみ関係と平均応力-中央撓み 関係を表す。

アスペクト比 a/b の高いパネルに短辺方向圧縮荷重が働く 場合、かなり低い応力レベルで Fig3(a)に示すとおりの長辺 及び短辺方向に1半波ずつの基本座屈モードの撓みが発生 する。さらに荷重を増加させると、この撓みモードは Fig.3(b) に示すような短辺方向に半波モード、長辺方向にほぼ一定と なる円筒型の撓みへと変化する。この変化は、パネルが最終 強度を迎える前に発生する。

最終強度に達した後も、さらに荷重を与えていくと、塑性 ひずみが、短辺付近及び長辺方向の中心線付近に集中して発 生し、Fig.3(c)に示すいわゆる屋根型の撓みとなる。







Fig.3 Transition of deflection mode (As3Nohole,t=12mm)

次に、有孔パネルモデル(As3Off250, t=12mm)の崩壊挙動 の解析例を Fig.4 及び 5 に示す。Fig.4 は、撓みモードの変化 を表し、Fig.5(a)及び(b)は、それぞれ平均応力-平均ひずみ 関係、平均応力-中央撓み関係を表す。有孔パネルにおいて も開口無しモデルと非常に似た崩壊挙動となり、面外撓みが 基本座屈モード~円筒型~屋根型と遷移している。この現象 は、計算された全ての有孔パネルと開口無しパネルのモデル で観察された。



Fig.4 Transition of deflection mode(As3Off250,t=12mm)



Fig. 5 Results of buckling collapse analysis (As3Off500; t = 16 mm)

次に、各有孔パネルモデルの初期剛性、座屈強度、最終強 度の各強度性能について、開口無しパネルに対する低下率を 調べた。Table 2 は、同一寸法パネルの開口無しモデルの値 を 1 とした場合の各有孔パネルの剛性及び強度の値を示し ている。なお、座屈強度は固有値解析より求めた。

初期剛性の低下率に関しては、有効断面積の低下率(a-d)/a (Fig.6 参照)よりもやや大きい値(強度低下が少ない)と なる。この理由は、圧縮荷重に対し、基本的に開口部分だけ でなく開口の短辺方向の隣接部分も抵抗しなくなるが、当該 部分にせん断変形を介して荷重が僅かに流れ込むためと考 えられる。

座屈強度及び最終強度に関しても、ほとんどのケースでそ れらの低下率は有効断面積の低下率よりも大きい値となる。 その傾向は、初期剛性、座屈強度、最終強度と崩壊現象が進 むほど顕著となる。

さらに、同じ形状と大きさを有する開口について、開口の

288

日本船舶海洋工学会論文集 第3号

	Effective sec.area	Initial stiffness	Buckling strength	Ultimate strength
As3Nohole	1.000	1.000	1.000	1.000
As3Cir800	0.733	0.750	0.791	0.894
As3Cir400	0.867	0.876	0.888	0.952
As3Cir200	0.933	0.951	0.958	0.979
As3Off500	0.733	0.757	0.753	0.875
As3Off1000	0.733	0.744	0.721	0.737
As3Oval1000	0.667	0.677	0.759	0.870
As3Oval1200	0.600	0.636	0.729	0.850

Table 2 Strength performances of each models (t=16mm)



Fig.6 Definition of effective section area

位置のみを変化させた場合(As3Cir800、As3Off500 及び As3Off1000)を比較すると、開口が中央から離れる程、座屈 強度及び最終強度が低下している。これは、座屈後のパネル は主に短辺支持部の近傍で荷重を受け持つためと考えられ、 当該部分に開口があると中央部に開口がある場合よりも最 終強度が大きく低下する。特にAs3Off1000 は、開口面積が より大きいAs3Oval1200 と較べても低い最終強度となって おり、開口位置も強度を考える上で重要な因子となる事が示 されている。

3. 有孔パネルを表す ISUM 要素の開発

3.1 ISUM 要素の開発手順

有孔パネルを表わす ISUM 要素の開発に際しては、基本的 に藤久保、Kaeding らの提案した ISUM 手法⁴⁾をベースとし て、2.の検討から得られた知見を ISUM 要素に反映させた。 具体的には、撓みモードの遷移を考慮できる撓み関数を導入 することと、開口部或いは開口部近辺の積分点におけるひず み量を操作することにより有孔パネルの開口影響を考慮す ることとした。

3.2 撓み関数

藤久保、Kaeding らが提案した ISUM 要素では、曲げひず み成分は、要素の面外曲げ変形を表す撓み関数を曲げひずみ 一曲率関係に代入することにより導き、一方、大撓みにより



Fig.7 Coefficients f_1 , f_2 and f_3 and aspect ratio relationship

生ずる平面ひずみ成分は、撓み関数を適合条件式に代入して 求めた Airy 関数を用いて導いている。また、曲げ応力及び 平面応力は、平面応力状態の応力--ひずみ関係を用いて、そ れぞれ相当するひずみ成分から導いている。

2.で述べた弾塑性大撓み解析のシリーズ計算では、矩形パ ネルに短辺方向圧縮荷重を与えると基本座屈モード撓みか ら円筒型の撓みに変化する現象が観察でき、また開口の形状、 大きさ、位置を変化させてもこの傾向は変化しなかった。 ISUMにおいてこの2つの撓みモードを再現するために、(1) 式のような撓み関数を設定した。第1項及び第2項は、それ ぞれ基本座屈モードの撓み及び円筒型の撓みを表す。

$$w = A_b \sin \frac{\pi}{a} x \sin \frac{\pi}{b} y$$

$$+ A_c \left(f_1 \sin \frac{\pi}{a} x + f_3 \sin \frac{3\pi}{a} x + f_5 \sin \frac{5\pi}{a} x \right) \sin \frac{\pi}{b} y$$
(1)

(1)式中の A_b 及び A_c は、解析の中で共に未知数として取り 扱う。また、 f_1 、 f_3 、 f_5 は、(2)式で表される円筒型の撓み²⁾ をフーリエ級数展開して得られる値を係数として与えた。従 って、 f_1 、 f_3 、 f_5 は、Fig.7 のようにパネルのアスペクト比に 応じて変化をする。

$$w = A_c \cdot \begin{cases} \sin\frac{\pi}{b}x\sin\frac{\pi}{b}y, & 0 \le x \le \frac{b}{2} \\ \sin\frac{\pi}{b}y, & \frac{b}{2} < x \le a - \frac{b}{2} \\ \sin\frac{\pi\{x - (a - b)\}}{b}\sin\frac{\pi}{b}y, & a - \frac{b}{2} < x \le a \end{cases}$$
(2)

a: 長辺の長さ、b: 短辺の長さ

3.3 開口影響の考慮

ISUM は、通常の FEM と同様に剛性マトリクスを得るため、要素内のひずみエネルギーを数値積分により求めている。 また、撓み関数により発生する要素内の曲げひずみ及び面内 ひずみの分布を精度良く計算するために、ISUM 要素内に比



Fig.8 Definition of the area where strains are modified

較的多くの積分点を設けている。開口無しパネルの剛性マト リクスの求め方は、参考文献⁴⁾¹¹⁾に詳しく示されている。

有孔パネルの開口影響は、各積分点におけるひずみ量を以 下のとおりに操作することで考慮した。

(1) 開口部分である Fig.8 における Area 1 では、ひずみエネ ルギーが発生しないため、すべてのひずみ成分をゼロとする。
(2) 短辺方向に広がる開口隣接部である Area 2 では、2.に述 べたように、短辺圧縮荷重に対して若干抵抗するが、その影
響は僅かである。従って、Area 2 では短辺方向ひずみε, をゼ ロとする。

4. ISUM 解析結果と考察

Table 1 に示す全てのモデルについて新たに開発した ISUM 要素による解析を実施した。ISUM による解析では、 有孔パネルを1つの要素でモデル化し、初期撓み、境界条件 及び荷重条件は、すべて2.の FEM による弾塑性大撓み解析 に揃えた。ISUM においては長辺方向に15 個、短辺方向に9 個の計135 個の積分点を設けた。各積分点における降伏の判 定には、Egger の降伏関数⁴⁾¹¹⁾が用いられている。



(a) Average stress-average strain relationships

Fig.9 は、横軸を平均ひずみとし、撓み関数の未知数である*A*_bと*A*_cの推移を示したものである。2.の崩壊挙動の通り、 始めに基本座屈モードの振幅である*A*_bが大きく発達し、そ の後円筒型の撓み*A*_cへ遷移する様子が再現されている。

平均応力-平均ひずみ関係及び平均応力-中央撓み関係 について ISUM と FEM を比較した結果を Fig.10~Fig.13 に 示す。ただし、中央部に開口がある場合は、中央撓みに代え て、開口周辺部における撓みの最大値をプロットしている。 いずれの解析条件においても、最終強度に達する $\varepsilon_y/\varepsilon_Y$ =1.0 までは、両者の値は良く一致している。



Fig.9 Transition of deflection mode obtained from ISUM analysis (As3Cir800,t=24mm)





2006年6月







(a) Average stress-average strain relationships

(b) Average stress-central deflection relationships





Fig.13 Comparison between FEM and ISUM results (As2Cir800)



(As2cir400, t = 16 mm, $\epsilon_y / \epsilon_Y = 3.0$)





一方で、最終強度後の平均応力-平均ひずみ関係に関して は、どの解析条件においても誤差が生じる結果となった。こ の誤差の原因は、実際の最終強度後の崩壊挙動においては、 Fig.3(c)及びFig.4(c)で示すようなより高次なモードの面外変 形が生じ、Fig.14(a)に示すような短辺周辺の局所的な塑性変 形が起きることと関連していると考えられる。一方、ISUM の解析においては、Fig.14(b)に示すように局所的な塑性変形 が発生していない。ISUMにおいて、これらの現象を忠実に 再現するためには最終強度後に発生する屋根型の撓みを再 現できる高次な撓み関数、さらに、ひずみ局所化を表すこと のできる高次の面内変位関数を採用する必要があるが¹⁰⁾、 一方で、計算処理量が増えて実用的解析法である ISUM のメ リットが薄れてしまう。今後、より簡便な方法で最終強度後 においても FEM と同等の値を与える ISUM 要素を引き続き 検討する必要があると考える。

5. 結 言

本研究では、有孔矩形パネルの崩壊挙動を調べるため、非 線形 FEM による弾塑性大撓み解析のシリーズ計算を実施し た。得られた知見を以下に示す。

(1) 短辺方向荷重を受ける矩形パネルは、初めに長辺方向及び短辺方向に1半波ずつの基本座屈モードが発生するが、 圧縮ひずみが大きくなると、基本座屈モードから円筒状 モードに変化する。

- (2) 開口の有無、形状、大きさ、位置に関わらず、上記(1) の撓みモードの変化が発生する。
- (3) 開口の形状や面積だけでなく、開口位置によっても大き く座屈強度及び最終強度が変化する。一般に、開口が中 央から離れるほど最終強度は低下する。

シリーズ計算の結果に基づいて、開口の影響を考慮できる 新しい ISUM 要素を開発した。また、ISUM と非線形 FEM による解析結果の比較により、新しい ISUM 要素の適用性及 び精度を検証した。以下に得られた知見を示す。

- (1) ISUM の撓み関数として、基本座屈モードと円筒型の撓 みモードの2つの面外撓みモードを考慮することで、矩 形パネルの短辺方向圧縮荷重下の崩壊挙動を精度良く 表すことができる。
- (2) ISUM 要素内の開口部分及びその近傍に位置する積分点 において、それらに対応する専用の変位一ひずみ関係の 条件を与えることで、開口の影響を精度良く推定できる。
- (3) 最終強度後の ISUM 結果は、FEM 結果と比較して非安全 側の値となる。この原因は、材料の塑性化に伴うより高 次な面外撓みモードの発生、面内ひずみの局所化の現象 を ISUM で表現できないためと考えられる。本件に関し ては、今後引き続き研究を進める予定である。

参 考 文 献

上田幸雄, SMH Rashed, 白点基:矩形板及び防撓板の理想
 化構造要素の開発(第1報),日本造船学会論文集,第 156
 号(1984), pp.366-377.

2) M.Fujikubo, P.Kaeding and T. Yao: ISUM Rectangular Plate Element with New Shape Functions(1st Report), 日本造船学会 論文集, 第 187 号(2000), pp.209-219.

3) M.Fujikubo, P.Kaeding and T. Yao: ISUM Rectangular Plate Element with New Shape Function s(2nd Report), 日本造船学会 論文集, 第 188 号(2000), pp.209-219.

4) M.Fujikubo and P.Kaeding : New Simplified Approach to Collapse Analysis of Stiffened Plates, Marine Structures, Vol 15(2002), pp.251-283.

5) M.Fujikubo, D.Yanagihara, Y.Setoyama and DV.Olaru : ISUM Approach for Collapse Analysis of Double-Bottom Structures in Ships, Int J Offshore and Polar Eng, Vol.13(2003), pp.224-231

6) M.Fujikubo, P.Kaeding and Z.Pei : Idealized Structural Unit Method for Collapse Analysis of Stiffened Plated Structure, Proc. Int. Conf. on Computational Method in Marine Engineering, Oslo, Norway, 2005, pp.385-394.

7)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.

8) P.Kaeding and M.Fujikubo : Idealized Structural Unit Method for Collapse Analysis of Stiffened Plate Structures, Ship Technology Research, Vol. 50(2003), pp.23-33.

9) P.Kaeding, DV.Olaru and M.Fujikubo : Development of ISUM plate element with consideration of lateral pressure effects and its application to stiffened plates of ships, Proc. PRAD'2004, Luebeck-Travemunde, Germany, Vol 1,pp.148-155.

10) K.Ishibashi, K.Iijima and T.Yao : Accuracy of Plate Element in Compression, Proc. 19th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, Singapore, 2005, CD-ROM.

11) T.Yao : Advance in Analysis of Ultimate Strength of Ship Structure, Proc. Computational Mechanic in Marine Engineering Oslo, Norway, 2005, pp.1-22