

船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響（第7報）

－圧縮最終強度，せん断最終強度に及ぼす腐食ピットの影響－

正員 中 井 達 郎* 正員 松 下 久 雄*
正員 山 本 規 雄*

Effect of Corrosion on Static Strength of Hull Structural Members (7th Report)

by Tatsuro Nakai, *Member* Hisao Matsushita, *Member*
Norio Yamamoto, *Member*

Summary

Pitting corrosion is typical corrosion observed on coated hold frames of bulk carriers which exclusively carry coal and iron ore. In order to secure the safety of these types of bulk carriers, it is important to understand the effect of pitting corrosion on local strength of hold frames.

In order to investigate this effect, a series of non-linear FE-analyses has been performed with pitted rectangular plates under compressive and shear loading conditions. It has been revealed that ultimate compressive and shear strength of pitted plates is smaller than that of uniformly corroded plates in terms of average thickness loss and that prediction results of ultimate strength using average thickness loss at the minimum cross section would be on the safe side. It has been also found that reduction of tensile strength due to pitting corrosion is larger than that of ultimate compressive and shear strength.

1. 緒 言

本研究は、石炭と鉄鉱石を運搬するばら積み貨物船の腐食ピットが発生している構造部材の局部強度の評価法確立を目的として実施している[1]-[7]。腐食ピットが発生している構造部材の残存強度を実験や解析により検討する場合、部材表面の凹凸が残存強度に影響を及ぼすと考えられることから、腐食実態すなわち実際の腐食ピットの形態を考慮する必要がある。そこで、既報[1]-[3]では、まず3隻のばら積み貨物船の貨物倉倉内肋骨の腐食実態を調査し、以下のようなことを明らかにした。

- ・倉内肋骨に見られる典型的な腐食ピットは、円錐形であり、その直径と深さの比は8:1～10:1の範囲にある。

例として、船齢14年のばら積み貨物船から採取したサンドブラスト後の倉内肋骨[1]をFig.1に示す。この図から、腐食ピットが部材表面全体に広がっていることが分かる。また、Fig.2に、上記とは異なる船齢14年のばら積み貨物船の倉内肋骨に発生していた腐食ピットの断面写真を示す。この図から分かるように、腐食ピットが



Fig. 1 Pitting corrosion in hold frame

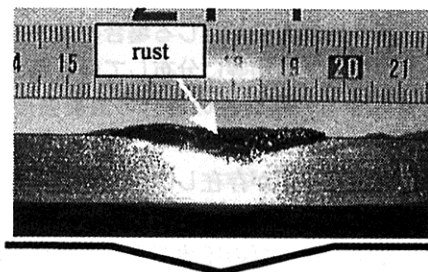


Fig. 2 Cross-sectional view of corrosion pit

発生している箇所では、こぶ錆が盛り上がるように発生しており、また、腐食ピットは、断面形状が三角形の円錐形であることが分かる。

腐食ピットが発生している部材の強度評価方法を確立するためには、どのような荷重条件下における破壊形

* (財)日本海事協会 技術研究所

原稿受理 平成17年3月22日

態や崩壊形態が腐食ピットによる影響を最も強く受けるかについて検討する必要があると考え、第2段階として、構造部材を構成する板要素レベルの強度に及ぼす腐食ピットの影響を調査するために、実際に腐食ピットが発生している部材、及び、模擬腐食ピットを設けた試験片を用いて、引張試験、及び、圧縮座屈試験を実施した[1]-[3]。これらの実験から以下のようなことを明らかにした。

- ・腐食ピットによる衰耗量が増加するにつれて、部材の公称引張強さは徐々に低下し、破断伸びは急激に低下する。
- ・小型引張試験片における引張強度は、[最小断面積]×[材料の引張強さ]により予測可能である。
- ・幅広引張試験片の場合、大きなピット部に局所的な塑性変形が集中し、局所破壊が開始する場合があるため、その正味破断応力は、小型試験片よりも小さくなる場合がある。
- ・腐食ピットが発生している部材の圧縮最終強度は、平均衰耗量で整理した場合、一様衰耗の場合の最終強度とほぼ等しいかそれよりも小さくなる。

上記の通り、単純な荷重条件下における板要素の強度に及ぼす腐食ピットの影響についてはデータが蓄積されつつあるが、構造強度に及ぼす腐食ピットの影響についても検討する必要があると考えられる。そこで第3段階として、第3報～第6報[4]-[7]においては、倉内肋骨の曲げ部材としての強度、すなわち、(1)座屈を生じない場合の崩壊強度[4]、(2)横倒れ座屈強度[5]、(3)局部座屈強度[6]、(4)ウェブのせん断強度[7]、及び、(5)集中荷重に対するウェブの圧壊強度[4]のそれぞれについてウェブに発生している円錐形の腐食ピットの影響を検討し、これまでに、以下のようなことを明らかにした。

- ・最終強度はウェブに発生している腐食ピットの影響を受け低下する。
- ・ウェブで曲げによる引張を受ける領域に腐食ピットが集中する場合、腐食ピット底部からき裂が発生する場合がある。
- ・横倒れ座屈や局部座屈が生じる場合の最終強度は、腐食ピットがウェブに均等に分布している場合、平均衰耗率に対応する一様衰耗の場合の最終強度とほぼ等しい。
- ・ウェブに腐食ピットが存在し、せん断座屈を生じる場合、座屈後にウェブで破断が生じる。
- ・集中荷重によりウェブの圧壊が生じる場合、応力が高い領域に腐食ピットが存在する方が強度低下が大きい。

以上のように、曲げ部材強度に及ぼす腐食ピットの影響についても、腐食ピットが発生している構造部材の局部強度の評価法検討のための基礎データが収集されつつある。

本報では、圧縮最終強度とせん断最終強度に及ぼす円

錐形の腐食ピットの影響について調査することを目的とした。よく知られている通り、圧縮座屈[8]-[10]やせん断座屈[11]-[15]については古くから数多くの研究がなされているが、腐食ピットによる強度低下という観点から研究が実施された例は少ないようである[16],[17]。圧縮最終強度やせん断最終強度に及ぼす腐食ピットの影響については、上述の通り、著者らの一連の研究[1]-[3],[7]で、腐食ピットが実際に発生している部材や模擬腐食ピットを設けた試験片を用いた実験により検討を進めているが、データが十分とはいえず、未だ不明な点が多い。そこで、本報では FEM を用いた弾塑性大たわみ解析によるシリーズ計算を実施し、円錐形の腐食ピットの分布や大きさの影響を調査するとともに、既報における模擬腐食ピットを設けた試験片を用いた引張試験結果[1],[3]と比較することにより、圧縮最終強度、せん断座屈強度、及び、引張強度のいずれが腐食ピットの影響を最も強く受けるかについても検討した。

2. 解析対象および解析手法

2.1 解析対象

腐食ピットが発生している矩形板を対象として、FEMを用いた弾塑性大たわみ解析を実施した。解析コードは MSC.Marc を使い、要素には 4 節点厚肉シェル要素 (Element Type 75) を用いた。また、腐食ピットの形状モデリング方法について検証するために、8 節点 6 面体ソリッド要素 (Element Type 117) を用いた解析も一部実施した。

解析対象モデルは、圧縮座屈モデル及びせん断座屈モデルとも Fig.3 に示す矩形板で、板幅 $b = 450 \text{ mm}$ 、長さ $a = 450 \text{ mm}$ 、板厚 $t = 10 \text{ mm}$ とし、腐食ピットの分布を変化させて解析を実施した。圧縮座屈モデルの場合、板厚 t が 13 及び 16 mm の場合、及び、長さ a が 900、1350 及び 2250 mm の場合についても一部解析を実施した。

境界条件は、面外変位については周辺単純支持とし、面内変位については周辺が直線を保持しながら変位するという条件を設けた。面内せん断力を導入するにあたっては、文献[13],[18],[19]を参考にして、Fig.3(b)及び Table 1 のような境界条件とともに、下式で表される拘束条件を与えた。

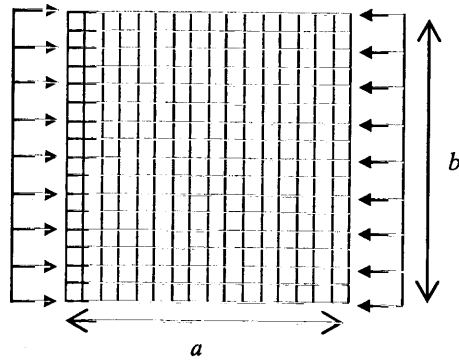
$$\text{点 AB 間: } u = \frac{x}{a} u_B \quad \cdots (1-1), \quad v = \frac{x}{a} v_B \quad \cdots (1-2)$$

$$\text{点 BC 間: } u = u_B \quad \cdots (2-1), \quad v = v_B + \frac{y}{b} v_D \quad \cdots (2-2)$$

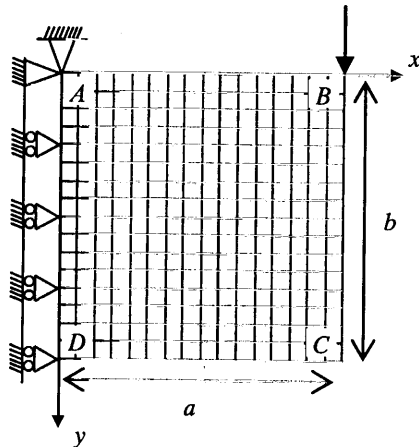
$$\text{点 CD 間: } u = \frac{x}{a} u_B \quad \cdots (3-1), \quad v = v_D + \frac{y}{b} v_B \quad \cdots (3-2)$$

$$\text{点 DA 間: } u = 0 \quad \cdots (4-1), \quad v = \frac{y}{b} v_D \quad \cdots (4-2)$$

ここで、 u 、 v は、それぞれ x 、 y 方向変位であり、添え字の B 及び D は、それぞれ点 B 及び D における変位であることを示す。



(a) Compression



(b) Shear

Fig. 3 Rectangular panel under compression and shear

本研究で取り扱う腐食ピットの形状は円錐形である。石炭と鉄鉱石を運搬する大型ばら積み貨物船の倉内肋骨に見られる典型的な腐食ピットは Fig.2 に示したとおり円錐形であり、その直径と深さの比は 8:1~10:1 程度の範囲にある[1]-[3]。ここでは、より厳しいケースすなわち同じ直径に対してより深い腐食ピットを想定して直径と深さの比は 8:1 とし、その直径は 20、30 あるいは 40mm で一定とした。また、腐食ピット底部の残存板厚が最も小さくなる場合を想定して、板の両面の同じ位置に腐食ピットを配置した。なお、比較のため上記の 3 種類の直径の腐食ピットが混在する場合についても一部解析を実施した。解析に用いた腐食ピットの分布の例を Fig.4 に示す。以上のように、解析対象モデルは腐食ピットの分布、腐食ピットの直径、及び、板厚を主なパラメータとしており、以下のように表記するものとする。

圧縮座屈： CAj-D-t あるいは CBk-D-t
せん断座屈： SAj-D-t あるいは SBk-D-t

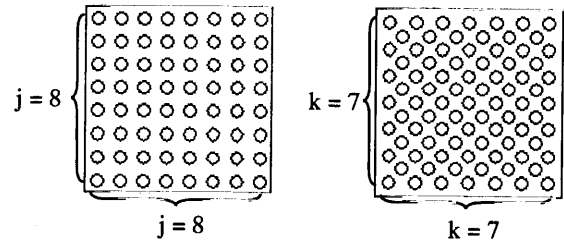
ここで、C 及び S はそれぞれ圧縮座屈モデル及びせん断座屈モデルを表す。また、A 及び B は、それぞれ Fig.4(a)、(c)及び(b)、(d)に示した腐食ピット分布を表し、j 及び k は Fig.4(a)、(c)及び(b)、(d)に示す位置の腐食ピットの個

Fig. 1 Boundary conditions in shear buckling analysis

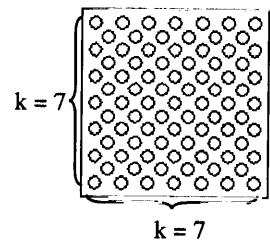
Edge	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
$x = 0$	1	0	1	1	0	1
$x = a$	0	0	1	1	0	1
$y = 0$	0	0	1	0	1	0
$y = b$	0	0	1	0	1	0

Note :

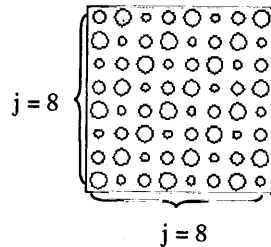
free = 0, fixed = 1

 u, v, w = x-, y-, z-displacement, respectively $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ = rotation about x-, y-, z-axis, respectively

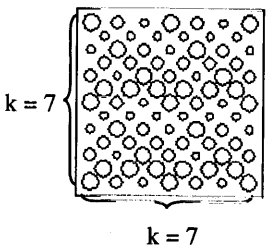
(a) CA8-30-t or SA8-30-t



(b) CB7-30-t or SB7-30-t



(c) CA8-234-t or SA8-234-t



(d) CB7-234-t or SB7-234-t

Fig. 4 Example of pit distribution

数である。D は腐食ピットの直径 ($D=20, 30$ または 40) であるが、3 種類の直径の腐食ピットが混在するモデルの場合には $D=234$ と表記する。t は板厚 ($t=10, 13$ または 16) である。解析したモデルは計 319 ケースであり、Table 2 にまとめて示した。

一般に、工作時に生じる溶接変形などの初期不整の分布は複雑であると言われている。本解析は、最終強度に及ぼす腐食ピットの影響について調査することを主目的としているため、初期不整は下式に示す単純なたわみ波形[20]を仮定した。

$$w = w_0 \sum_{i=1}^n \sin \frac{i\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad \cdots (5)$$

ここで、 w_0 は板厚 t の 1/100 とし、 n の値は、アスペクト比 $a/b=1, 2, 3$ 及び 5 に対してそれぞれ 1, 2, 3 及び 5 とした。なお、溶接残留応力は考慮していない。

材料は、YP32 鋼を想定して、ヤング率 E は 205.8 GPa、降伏応力 σ_y は 313.6 MPa とし、加工硬化率 H' は $E/75$ と仮定した。

2.2 腐食ピットの形状モデリング

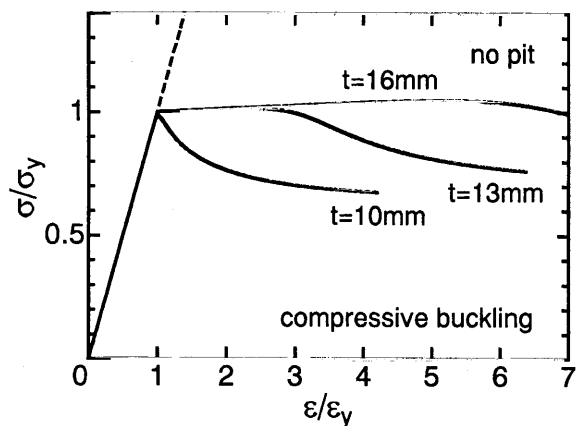
本解析で問題となるのは、腐食ピットの形状モデリン

Table 2 Calculated models with pitting corrosion

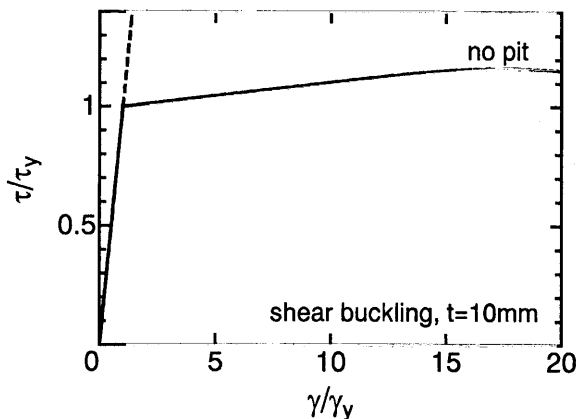
Load Type	Model	D (mm)	j or k	t (mm)	a/b
Compression	CAj-D-t	20	4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21	10, 13, 16	1
		30	4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15	10, 13, 16	1, 2*, 3*, 5*
		40	4,5,6,7,8,9,10,11	10, 13, 16	1
		20,30,40	4,5,6,7,8,9,10,11	10, 13, 16	1
	CBk-D-t	20	3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15	10, 13, 16	1
		30	3,4,5,6,7,8,9,10	10, 13, 16	1
		40	3,4,5,6,7,8	10, 13, 16	1
		20,30,40	3,4,5,6,7,8	10, 13, 16	1
Shear	SAj-D-t	20	4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21	10	1
		30	4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15	10	1
		40	4,5,6,7,8,9,10,11	10	1
		20,30,40	4,5,6,7,8,9,10,11	10	1
	SBk-D-t	20	3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15	10	1
		30	3,4,5,6,7,8,9,10	10	1
		40	3,4,5,6,7,8	10	1
		20,30,40	3,4,5,6,7,8	10	1

Note :

*a/b = 2, 3 and 5 are used only for CA10-30-10



(a) Compression



(b) Shear

Fig. 5 Average stress-average strain relationships (no pit)

グ方法であるが、本モデルでは、一辺の長さが 6mm の正方形のシェル要素でモデリングし、ピットの位置と直

径、直径と深さの比、及び、ピット形状が円錐形であることから各節点における板厚を求め、各要素を構成する節点における板厚の平均値をその要素の板厚とした。これまでに、板厚程度の大きさのシェル要素を用いて上記のようなピットの形状モデリング方法により、圧縮試験結果、及び、構造モデルを用いた各種試験結果の解析を実施してきた[1]-[7]が、そのモデリング方法の妥当性についてはさらに検討の余地がある[7]。そこで、予備解析において、さらにピット部のメッシュを細かくしたシェル要素を用いたモデル、及び、ソリッド要素を用いたモデルでも解析を実施し、上記のモデリング方法の妥当性を検証した。

3. 解析結果

3.1 基本的な変形挙動

まず、圧縮座屈モデルについて腐食ピットが存在しない場合の各板厚における変形挙動を平均応力と平均ひずみの関係で Fig.5(a)に示す。この図から分かるように、板厚が 13 あるいは 16mm の場合は、塑性変形が進んでから最終強度に達し荷重低下を生じるのに対して、板厚が 10mm の場合は、平均応力がほぼ降伏応力に達した時点で最終強度に達し荷重低下が生じ始める。

次に、せん断座屈モデルについて腐食ピットが存在しない場合の変形挙動を平均応力と平均ひずみの関係で Fig.5(b)に示す。この図から分かるように、塑性変形が進んでから最終強度に達し荷重低下を生じる。

3.2 予備解析結果

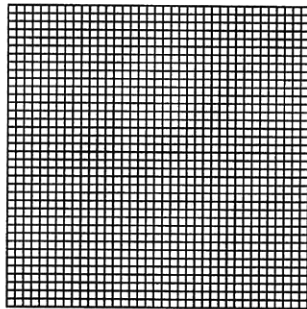
ここでは、解析精度に及ぼすピットの形状モデリング方法の影響を調査するため、圧縮座屈モデルの場合について、下記の 3 種類のモデリング方法について検討した。

Type SH-1 :

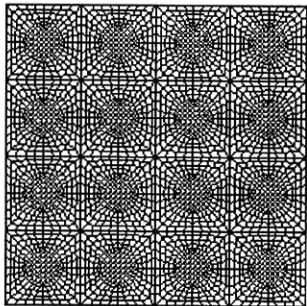
一辺の長さが 6mm の正方形のシェル要素を用いた形状モデル

Type SH-2 :

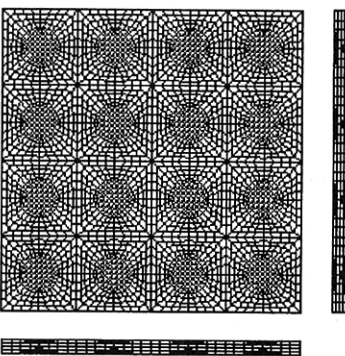
Type SH-1 同様にシェル要素を用いるが、ピットが存在する部分の要素をさらに細かくした形状モデル



(a) Type SH-1



(b) Type SH-2



(c) Type SO

Fig. 6 Geometrical modeling of CA8-30-10

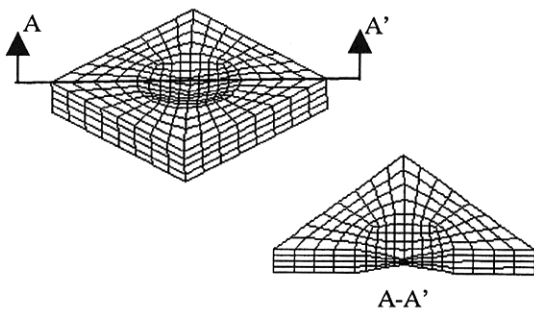


Fig. 7 Geometrical modeling of corrosion pit

Type SO :

ピットが存在する部分の要素を Type SH-2 同様に細かくし、ソリッド要素を用いた形状モデル

解析対象モデルは CA8-30-10 であり、 a/b は 1 とした。ここでは、対称性を考慮して矩形板の 4 分の 1 をモデリングした。なお、Type SH-2 及び Type SO は、文献[16],[17]におけるモデリング方法を参考にしたものである。上記のそれぞれの形状モデルを Fig.6 に示す。また、ソリッド要素を用いた Type SO における 1 つの腐食ピットとその周辺のモデリング状況及びその断面図を Fig.7(a)及び Fig.7(b)に示す。Fig.8 にそれぞれの形状モデルを用いた場合の荷重変位曲線を示す。この図から分かるように、上記の3つの形状モデルを用いた解析結果はほぼ一致する。このことから、これら3つの形状モデルの中で最も簡易なモデルである Type SH-1 を次節以降の解析において用いることにした。

3.3 最終強度に及ぼす腐食ピットの影響

まず、圧縮座屈モデルについて、Fig.9(a)、(b)及び(c)にそれぞれの板厚 ($t=10, 13$ 及び 16mm) における腐食ピットが存在する場合の最終強度 σ_u/σ_{u0} (最終強度 σ_u を腐食ピットがない場合の最終強度 σ_{u0} で無次元化したもの) と平均衰耗率の関係を示す。図中の実線は、一様衰耗の場合すなわち板厚一定で衰耗が進むと仮定した場合の最終強度を示す。これらの図から分かるように、いずれの板厚の場合も腐食ピットが存在する場合、一様衰耗の場合よりも最終強度の低下量が多い。また、その低下量は、板厚が小さく腐食ピットが大きくなるほど大きくなる傾向が見られる。

次に、せん断座屈モデルについて、腐食ピットが存在する場合の最終強度 τ_u/τ_{u0} (腐食ピットがない場合の最終強度 τ_{u0} で無次元化したもの) と平均衰耗率の関係を Fig.10 に示す。この図から分かるように、せん断座屈モデルの場合、腐食ピットが存在する場合、最終強度の低下量は一様衰耗の場合とほぼ同等かそれよりも大きい。また、その低下量は、腐食ピットが大きくなるほど大きくなる傾向が見られる。

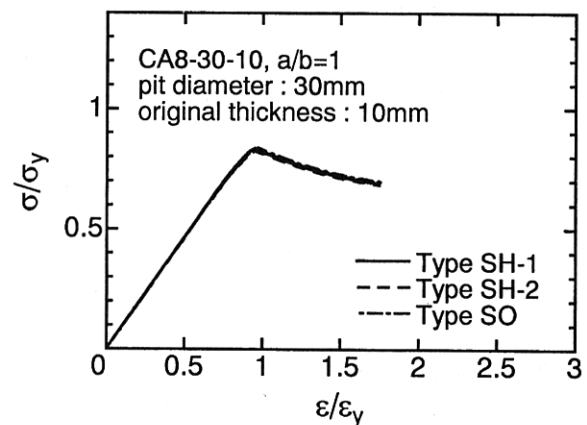


Fig. 8 Effect of modeling method on average stress-average strain relationships

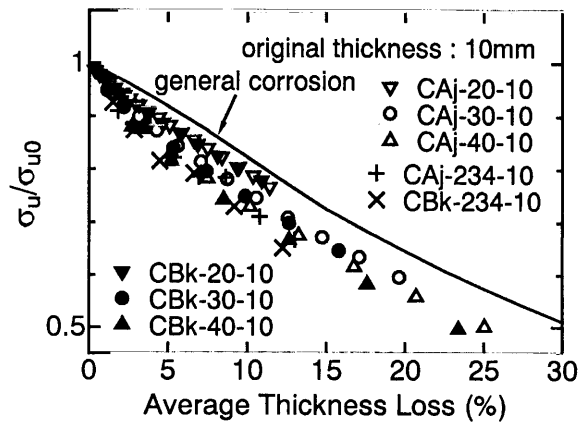
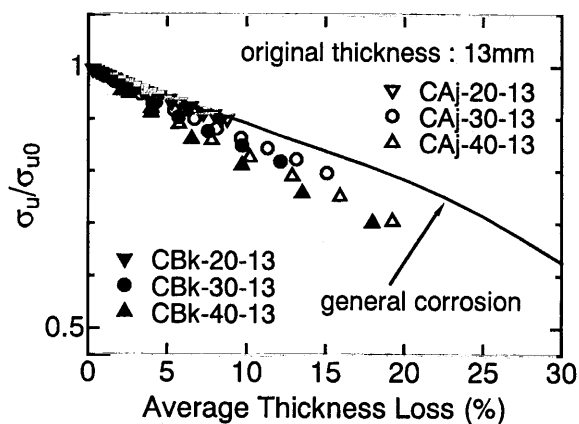
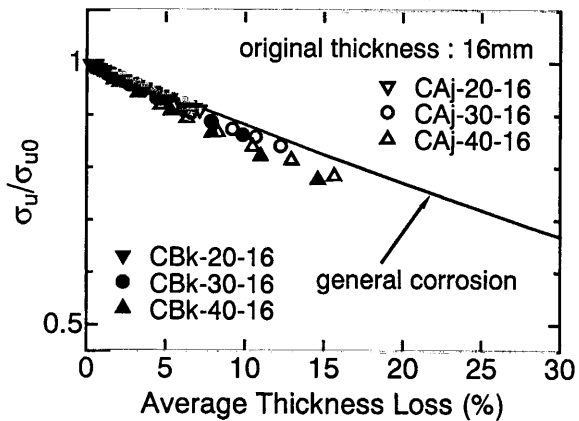
(a) $t_0 = 10\text{mm}$ (b) $t_0 = 13\text{mm}$ (c) $t_0 = 16\text{mm}$

Fig. 9 Relationship between ultimate strength and average thickness loss in compressive buckling analysis

以上の結果から、平均衰耗量により最終強度を予測した場合、危険側の予測結果を与えることが分かる。

3.4 最小断面における平均板厚による評価

衰耗量を用いた解析結果の整理方法のひとつとして、前節では、全体の平均衰耗量で整理した結果について述べた。ここでは、荷重軸に対して垂直な断面で最も断面

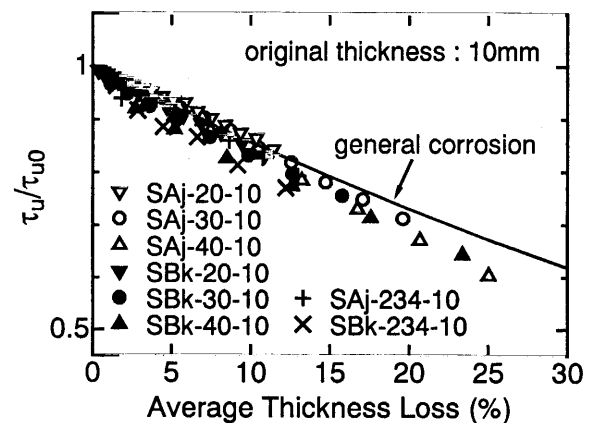


Fig. 10 Relationship between ultimate strength and average thickness loss in shear buckling analysis

積が小さくなる断面における平均衰耗量により解析結果を整理した結果について述べる。まず、圧縮座屈モデルについて、最終強度 σ_u/σ_{u0} と最小断面における平均衰耗率の関係を Fig.11(a)~(c)に示す。これらの図には、一様衰耗すなわち板厚一定で衰耗が進む場合の解析結果についても実線で示した。Fig.11(a)~(c)から分かるように、最小断面における平均衰耗量で整理した場合、いずれの板厚においても腐食ピットが存在する場合の解析結果は、一様衰耗の場合よりも最終強度が高く、その傾向は、元厚が小さいほど大きい。また、最終強度の大小は、ピット分布形態にも依存し、ピット分布 B (Fig.4(b), (d)) よりもピット分布 A (Fig.4(a), (c)) の方が最終強度が大きくなる傾向が明確であり、ピット分布 A の場合、腐食ピットの個数が多くなると一様衰耗の場合からのずれが著しくなる傾向が見られる。

次に、せん断座屈モデルについて、腐食ピットが存在する場合の最終強度 τ_u/τ_{u0} (腐食ピットがない場合の最終強度 τ_{u0} で無次元化したもの)と最小断面における平均衰耗率の関係を Fig.12 に示す。せん断座屈モデルの場合、圧縮座屈モデルと異なり、荷重軸は定義できないが、最小断面は圧縮座屈モデルの場合と同じ断面とした。この図には、一様衰耗すなわち板厚一定で衰耗が進む場合の解析結果についても実線で示した。圧縮座屈モデルと同様に、腐食ピットが存在する場合、一様衰耗の場合よりも最終強度が高く、最終強度の大小は、ピット分布形態にも依存しピット分布 B (Fig.4(b), (d)) よりもピット分布 A (Fig.4(a), (c)) の方が最終強度が大きくなる傾向が明確であり、ピット分布 A の場合、腐食ピットの個数が多くなると一様衰耗の場合からのずれが著しくなる傾向が見られる。

以上の結果から、最小断面における平均衰耗量により最終強度を予測した場合、安全側の予測結果を与えるが、過度に安全側となる場合があることが分かる。

3.5 ピット面積率と最終強度との関連

Fig.9~Fig.12 に示したように、平均衰耗量や最小断面

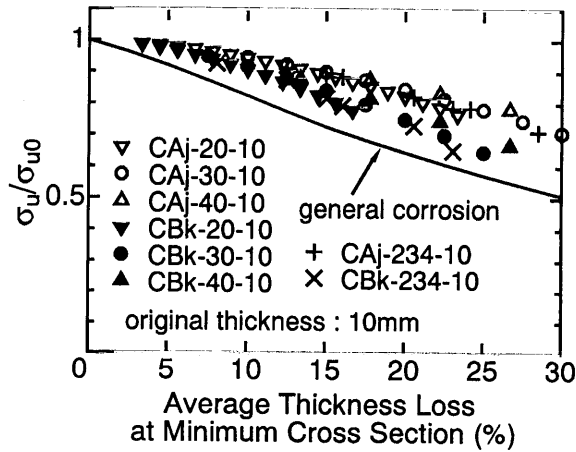
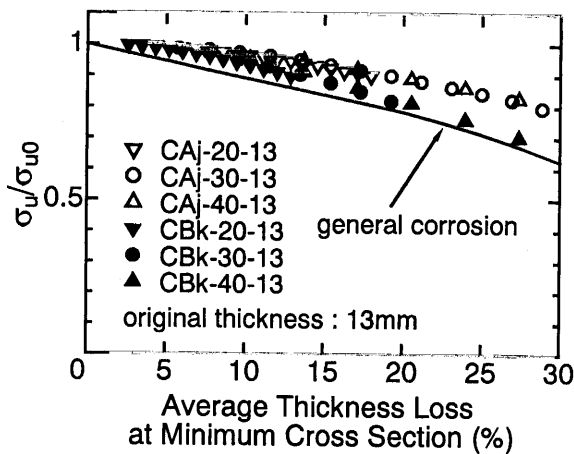
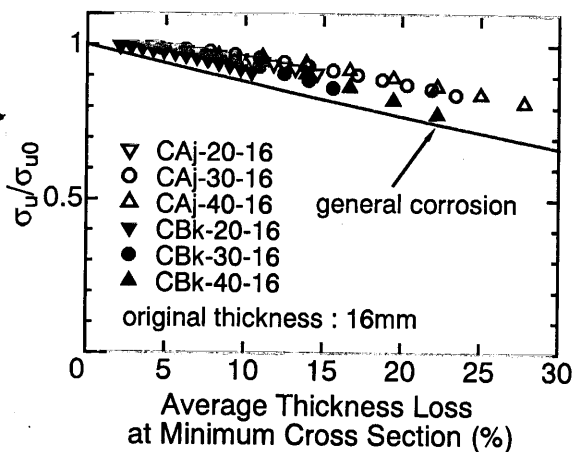
(a) $t_0 = 10\text{mm}$ (b) $t_0 = 13\text{mm}$ (c) $t_0 = 16\text{mm}$

Fig. 11 Relationship between ultimate strength and average thickness loss at minimum cross section in compressive buckling analysis

における平均衰耗量といった衰耗量をパラメータにとった評価も重要であるが、凹凸の激しい腐食形態を考えると、平均衰耗量や最小断面の決定が困難であることが

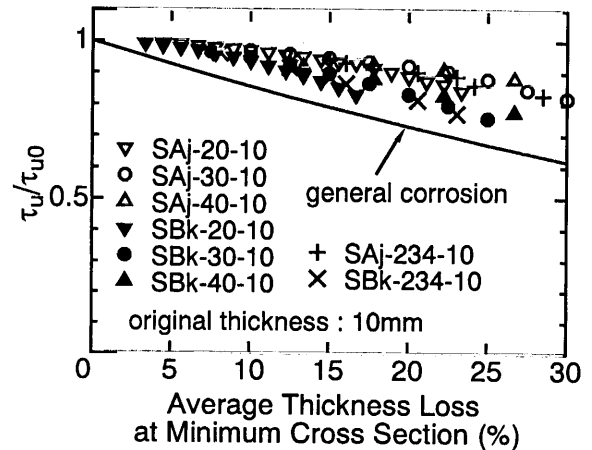


Fig. 12 Relationship between ultimate strength and average thickness loss at minimum cross section in shear buckling analysis

予想される。従って、表面状態すなわちピット面積率 (DOP: Degree of Pitting Intensity、全表面積に対する腐食ピットの占める面積の割合) や腐食ピットの大きさなどのパラメータから残存板厚や残存強度を推定する方法についての検討も必要であると考えられる。ここでは、解析結果をピット面積率で整理した結果について述べる。

まず圧縮座屈モデルについて、Fig.13(a)~(c)に各板厚における等価板厚 t_e/t_0 (元厚 t_0 で無次元化したもの) とピット面積率の関係を示す。ここで等価板厚 t_e は、解析により求められた腐食ピットが発生している場合の最終強度から Fig.14 のマスターカーブ (一様衰耗の場合の腐食後の板厚と最終強度の関係) を用いて、同等の強度を有する一様衰耗の場合の板厚を求めたものである。Fig.13 から、ピット面積率及びピット直径が大きいほど等価板厚が小さくなる傾向が明確であり、この傾向は元厚が小さいほど大きいことが分かる。また、Fig.13(a)に示したように、元厚が 10mm の場合には、直径 20、30 及び 40mm のピットがほぼ同数ずつ混在している場合についても解析を実施している。この場合、ピット直径 40mm で一定の場合の等価板厚に近くなる傾向が見受けられる。

次に、せん断座屈モデルについて、Fig.15 に等価板厚 t_e/t_0 とピット面積率の関係を示す。等価板厚を求める際のマスターカーブ (一様衰耗の場合の腐食後の板厚と最終強度の関係) には Fig.16 に示したものをを用いた。Fig.15 から、ピット面積率及びピット直径が大きいほど等価板厚が小さくなる傾向が見られる。また、直径 20、30 及び 40mm のピットがほぼ同数ずつ混在している場合、ピット分布 A (Fig.4(c)) よりもピット分布 B (Fig.4(d)) の方が等価板厚が小さくなる傾向が見られ、ピット分布 B の場合、ピット直径 40mm で一定の場合の等価板厚に近くなる傾向が見受けられる。

以上のように、圧縮座屈モデル、せん断座屈モデルと

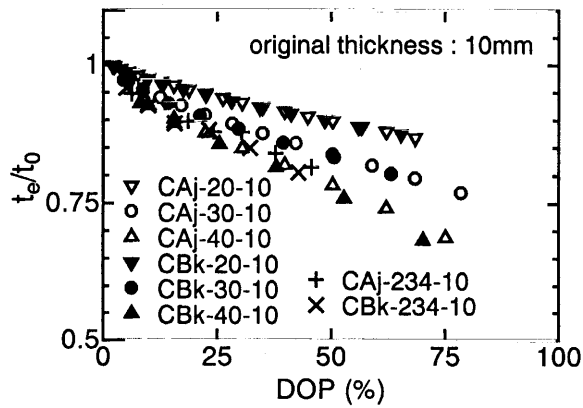
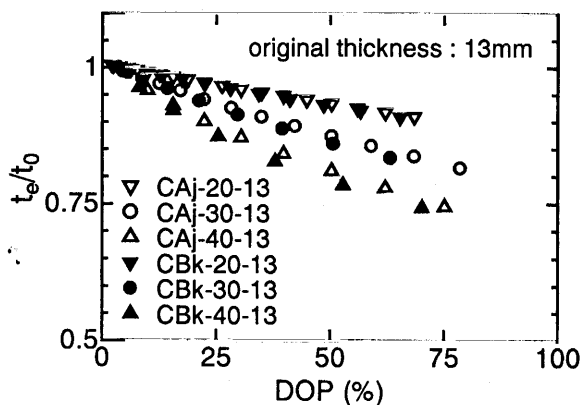
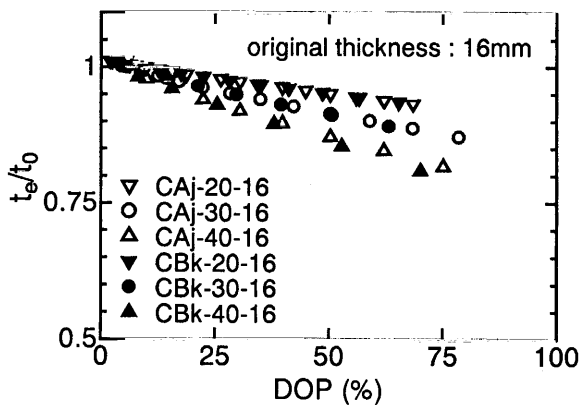
(a) $t_0 = 10\text{mm}$ (b) $t_0 = 13\text{mm}$ (c) $t_0 = 16\text{mm}$

Fig. 13 Relationship between equivalent thickness and degree of pitting intensity in compressive buckling analysis

もに、等価板厚は、元厚、ピット面積率とピット直径に依存するといえる。

3.6 アスペクト比の影響

圧縮座屈モデルについては、アスペクト比 a/b の影響を調査するために、 a/b を 1、2、3 及び 5 に変化させて解析を実施した。Fig.17(a)及び(b)にそれぞれ腐食ピットが存在しない場合及びモデル CA10-30-10 について、平均応力と平均ひずみの関係を示す。これらの図から分か

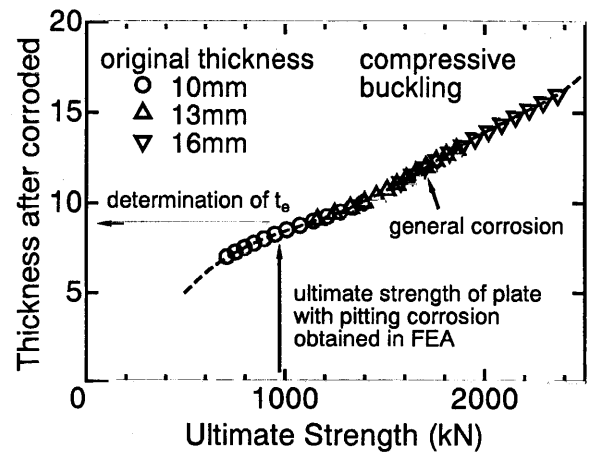


Fig. 14 Relationship between thickness and ultimate strength for uniformly corroded panels in compressive buckling analysis

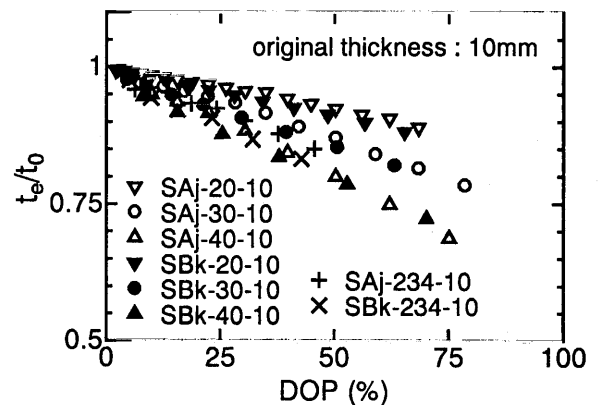


Fig. 15 Relationship between equivalent thickness and degree of pitting intensity in shear buckling analysis

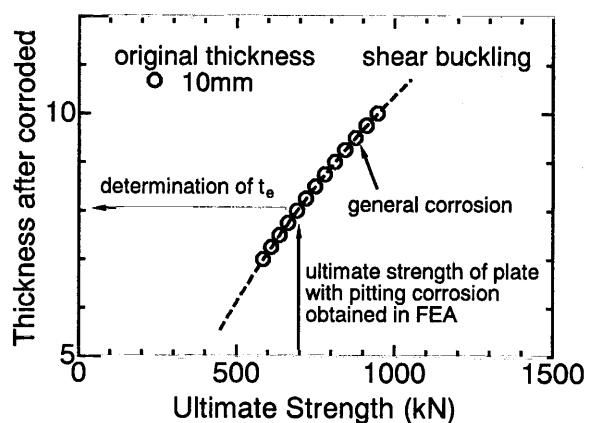
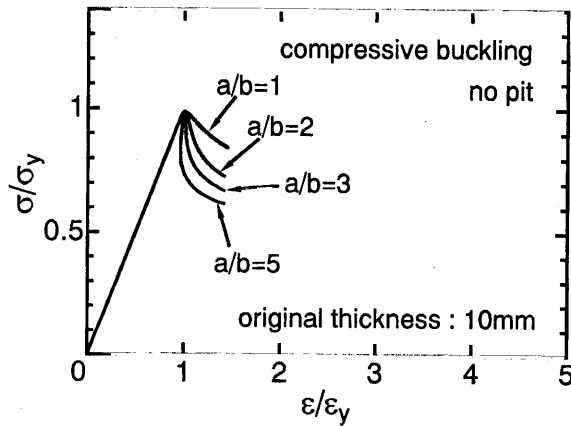
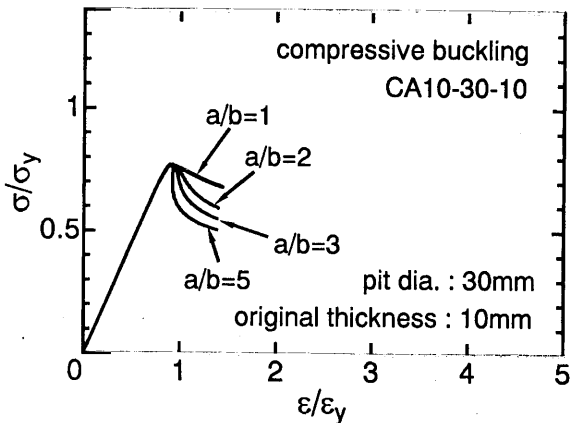


Fig. 16 Relationship between thickness and ultimate strength for uniformly corroded panels in shear buckling analysis

るように、圧縮座屈モデルの場合、腐食ピットの有無に関わらず、最終強度はアスペクト比の影響をほとんど受けない。ただし、アスペクト比が大きくなるほど最終強度後の荷重低下は大きくなる傾向が見られる。



(a) No pit



(b) CA10-30-10

Fig. 17 Effect of aspect ratio on average stress-average strain relationships in compressive buckling analysis

4. 引張強度との比較

腐食ピットによる強度低下が最も大きい荷重条件や崩壊形態について強度評価法を確立すれば、他の条件においては安全側の評価となることが予想される。そのため、各種強度のうちのいずれが腐食ピットの影響を最も受けやすいかを検討しておく必要がある。ここでは、前章までに検討した板要素の圧縮最終強度及びせん断最終強度と既報[1],[3]における引張試験結果を比較し、腐食ピットによる最終強度の低下量の比較を行う。

まず、Fig.18 に各板厚における引張試験及び圧縮座屈モデルの等価板厚とピット面積率の関係をピット直径が30mmで一定の場合について示す。ここで、板厚一定の場合、引張強度は板厚に比例すると考えられることから、引張強度の等価板厚 t_e/t_0 と σ_u/σ_{u0} の間には、下式が成立するものと仮定した。

$$\frac{t_e}{t_0} = \frac{\sigma_u}{\sigma_{u0}} \quad \dots(6)$$

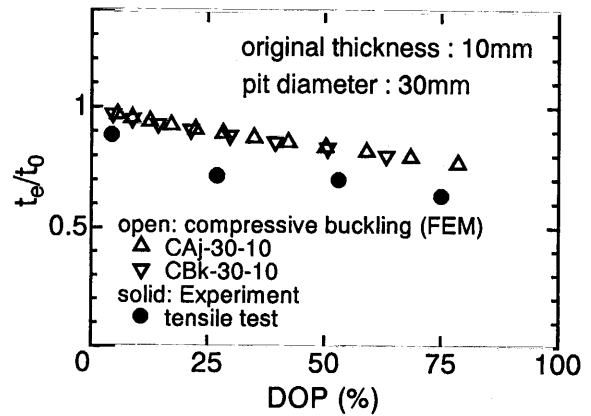
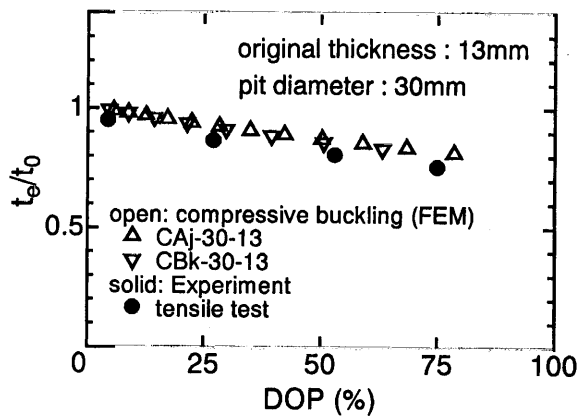
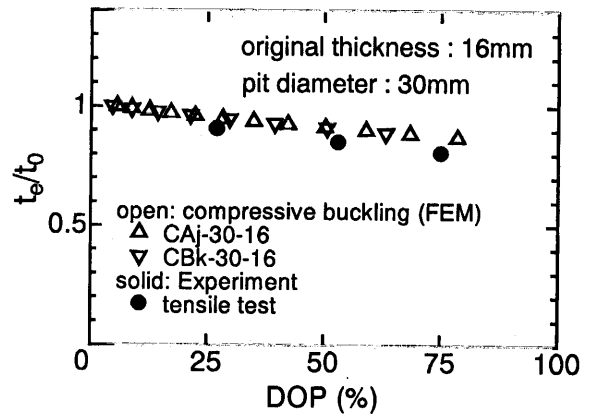
(a) $t_0 = 10\text{mm}$ (b) $t_0 = 13\text{mm}$ (c) $t_0 = 16\text{mm}$

Fig. 18 Relationship between equivalent thickness and degree of pitting intensity in compressive buckling analysis (Comparison with tensile test results)

ここで、比較に用いた引張試験結果は、既報[1],[3]のものであり、試験片の両面には、標線間の80mm×200mmの領域に、直径30mmで、直径と深さの比が8:1の模擬腐食ピットを試験体両面の同じ位置にFig.19のような分布でドリル加工により設けている。Fig.18から分かるように、腐食ピットが発生している部材の引張強度の等価

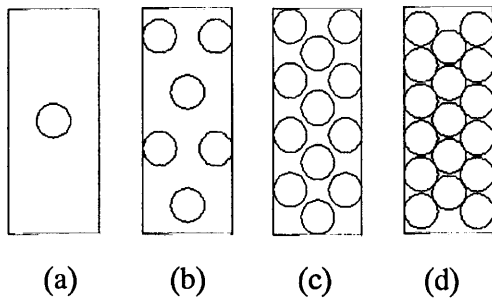


Fig. 19 Pit distribution in tensile test[1],[3]

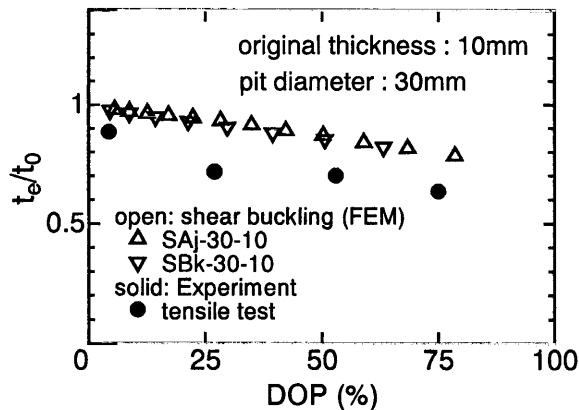


Fig. 20 Relationship between equivalent thickness and degree of pitting intensity in shear buckling analysis (Comparison with tensile test results)

板厚は、圧縮最終強度のそれよりも小さくなる傾向が見られ、板厚 10mm の場合、特に小さくなっている。

次に、Fig.20 に、引張試験及びせん断座屈モデルの等価板厚とピット面積率の関係をピット直径が 30mm で一定の場合について示す。この図から、圧縮座屈モデルの場合と同様に、引張強度の等価板厚は、せん断最終強度のそれよりも小さくなる事が分かる。

以上のことから、引張強度、圧縮最終強度及びせん断最終強度の中では、引張強度が最も腐食ピットの影響を受けるといえる。

5. 今後の課題

一樣衰耗の場合の許容衰耗量は、部材にもよるが、基本的には元厚 t_0 に対する比(%)で示されている[21]。凹凸が激しい腐食ピットが発生している場合には、一樣衰耗の場合で同等な強度を持つ部材の板厚、すなわち、等価板厚 t_e と元厚との差 $t_0 - t_e$ を考えれば、一樣衰耗の場合の許容衰耗量と直接的な比較が可能であると考えられる。本報では、板要素の単純な荷重条件下における等価板厚、すなわち、引張強度、圧縮最終強度及びせん断最終強度のそれぞれの強度における等価板厚に及ぼす円錐形の腐食ピットの影響について比較したが、その結果、引張強度で考えた場合の等価板厚が最も腐食ピットの影響を受けることが明らかとなった。したがって、許容衰耗

量という観点から考えた場合、腐食ピットが発生している部材の引張強度で考えた場合の等価板厚評価法を確立すれば、圧縮最終強度やせん断最終強度については安全側の評価が可能であると考えられる。なお、既報のばら積み貨物船の倉内肋骨を模擬した構造物モデル試験の結果から、ウェブにピットが存在する場合、曲げが支配的な場合でもウェブ上の曲げによる引張荷重を受ける箇所でき裂が発生することがあり[4]、また、せん断が支配的な場合にはウェブ上の斜張力場の引張荷重を受ける箇所でき裂が生じる[7]ことが明らかになっている。なおかつ、現場検査での利便性を考えると、最終強度比と等価板厚比が等しい引張強度での評価は非常に有効であると考えられる。これらのことから、倉内肋骨のウェブを想定した場合、引張強度を基準にした評価が合理的であると考えている。そこで、現在、円錐形の腐食ピットが発生している部材の引張強度の評価方法について検討中である。

6. 結 言

本研究では、バルクキャリア貨物倉倉内肋骨の局部強度に及ぼす円錐形の腐食ピットの影響を明らかにすることを目的とした。

第7報である本報では、圧縮最終強度及びせん断最終強度に及ぼす円錐形の腐食ピットの影響について、FEMを用いた弾塑性大たわみ解析によるシリーズ計算を実施することにより検討した。また、引張強度に及ぼす腐食ピットの影響との比較を実施した。以下に得られた主な結果を示す。

- (1) 腐食ピットが存在する矩形板の圧縮最終強度及びせん断最終強度は、平均板厚で整理した場合、一樣衰耗した矩形板よりも強度低下が大きい。また、腐食ピットが大きいほどその低下量が大きくなる。
- (2) 圧縮最終強度は、元厚が小さいほど、腐食ピットによる強度低下が大きい。
- (3) 腐食ピットが存在する矩形板の圧縮最終強度及びせん断最終強度は、最小断面における平均板厚で予測すると過度に安全側の評価となる場合がある。
- (4) 矩形板の圧縮最終強度及びせん断最終強度に及ぼす腐食ピットの影響は、引張強度の場合よりも小さい。

参 考 文 献

- 1) T. Nakai, H. Matsushita, N. Yamamoto and H. Arai : Effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of bulk carriers (1st report), Marine Structures, 17(2004), pp.403-432
- 2) 松下久雄, 中井達郎, 山本規雄, 荒井宏範 : 船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響 (第1報) -実部材での腐食ピット影響調査-, 日本造船学会論文集, 第192号(2002), pp.357-365

- 3) 中井達郎, 松下久雄, 山本規雄, 荒井宏範: 船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響 (第2報) - 人工ピット材を用いた強度調査 -, 日本造船学会論文集, 第195号(2004), pp.221-231
- 4) 中井達郎, 松下久雄, 山本規雄: 船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響 (第3報) - 模擬腐食ピットを有する構造モデルを用いた4点曲げ試験 -, 日本造船学会論文集, 第195号(2004), pp.233-242
- 5) 中井達郎, 松下久雄, 山本規雄: 船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響 (第4報) - 横倒れ座屈強度に及ぼす腐食ピットの影響 -, 日本造船学会論文集, 第196号(2004), pp.151-159
- 6) 中井達郎, 松下久雄, 山本規雄: 船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響 (第5報) - 局部座屈強度に及ぼす腐食ピットの影響 -, 日本造船学会論文集, 第196号(2004), pp.161-168
- 7) 中井達郎, 松下久雄, 山本規雄: 船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響 (第6報) - ウェブのせん断強度に及ぼす腐食ピットの影響 -, 日本造船学会論文集, 日本船舶海洋工学会論文集, 第1号(2005), 掲載予定
- 8) 上田幸雄, 矢尾哲也, 中村和博: 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1報) - 初期たわみ波形および初期たわみ量の影響 -, 日本造船学会論文集, 第148号(1980), pp.222-231
- 9) 藤久保昌彦, 矢尾哲也, Balu Varghese: 組み合わせ面内荷重を受ける矩形板の座屈・最終強度に関する研究, 西部造船会会報, 第93号(1997), pp.81-89
- 10) 矢尾哲也, 藤久保昌彦, 柳原大輔, 查煜峰, 村瀬知行: 面内圧縮荷重を受ける矩形パネルの最終強度後の挙動, 日本造船学会論文集, 第183号(1998), pp.351-359
- 11) K. Basler: Strength of plate girders in shear, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.87(1961), No.ST7, pp.151-180
- 12) 森脇良一, 藤野真之: 初期不整を有するプレートガーダーのせん断強度に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第249号(1976), pp.41-54
- 13) 奈良敬, 出口恭司, 福本嘯士: 純せん断応力を受ける鋼板の極限強度特性に関する研究, 土木学会論文集, 第392号/I-9(1988), pp.265-271
- 14) S. C. Lee and C. H. Yoo: Strength of plate girder web panels under pure shear, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.124, No.2(1998), pp.184-194
- 15) S. C. Lee and C. H. Yoo: Experimental study on ultimate shear strength of web panels, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.125, No.8(1999), pp.838-846
- 16) J. K. Paik, J. M. Lee and M. J. Ko: Ultimate compressive strength of plate elements with pit corrosion wastage, Journal of Engineering for the Maritime Environment, 217, M4(2004), pp.185-200
- 17) J. K. Paik, J. M. Lee and M. J. Ko: Ultimate shear strength of plate elements with pit corrosion wastage, Thin-Walled Structures, 42 (2004), pp.1161-1176
- 18) 天野麻衣, 渡辺智彦, 宇佐美勉, 葛漢彬: 繰り返しせん断力を受ける鋼板の強度と変形能, 第3回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, (2000), pp.57-62
- 19) 葛西昭, 渡辺智彦, 宇佐美勉, P. Chusilp: せん断力を受ける無補剛箱型断面部材の強度と変形能, 土木学会論文集, 第702号/I-59(2002), pp.129-140
- 20) 矢尾哲也, 林茂弘, 村上睦尚, 桑原隆彦: 面内圧縮荷重を受ける有孔矩形板の座屈・最終強度に関する研究 (その2), 日本造船学会論文集, 第191号(2002), pp.265-271
- 21) 日本海事協会, 船体構造部材の板厚計測及び精密検査, (1999)