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—

正員 中 井 達 郎* 正員 松 下 久 雄*
正員 山 本 規 雄* 正員 荒 井 宏 範**

Effect of Corrosion on Static Strength of Hull Structural Members (2nd Report)

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

Summary

The first report dealt with the investigation of pitting corrosion observed on hold frames of a 14 year old bulk carrier. Tensile strength and buckling strength of actual members taken from the bulk carrier were also investigated.

In the present study, a series of tensile tests and compression (buckling) tests has been conducted using test specimens with artificial pitting under a wide variety of testing conditions to investigate the effect of pitting corrosion on the strength in more details. The following results have been obtained;

- Tensile strength decreases gradually and total elongation decreases drastically with the increase of thickness loss. The reduction of tensile strength and total elongation is large when the original thickness is small.
- In general, ultimate strength of pitted members under compressive loading is smaller than that of uniformly corroded members in terms of average thickness loss.

Following the experiment, an elasto-plastic analysis has been carried out to simulate the buckling behavior observed in the compression test in order to verify the method of modeling members with pitting corrosion.

1. 緒 言

経年船における船体構造の損傷の多くは腐食衰耗が原因となって生じていることは良く知られている。船体構造部材に見られる腐食は、全面腐食（general corrosion）と局所腐食（local corrosion）に大別される。前報¹⁾で報告した通り、塗装が施されたばら積み貨物船の倉内肋骨には、塗装の劣化と共に非常に凹凸の激しい

腐食ピットが発生することがある。全面腐食の場合、腐食が均一に進行するのに対して、局所腐食の腐食ピットの場合、ピットの大きさや分布の影響があり、残存強度の評価が困難であると考えられる¹⁾¹⁴⁾。本研究は、このような腐食ピットが部材強度に及ぼす影響を明らかにし、切替え基準検討のための基礎データ収集を目的として行っている。前報¹⁾では、船齢14年のばら積み貨物船の倉内肋骨から採取された部材を用いて、腐食ピットの形状調査などの腐食の実態調査及び実部材を用いた強度調査を実施した。本報では、まず、前報¹⁾に引き続き実施した腐食の実態調査について述べる。次に、専ら石炭及び鉄鉱石を積載する大型ばら積み貨物船の倉内肋骨に見受けられる典型的な腐食ピットの形状を模擬した人工ピットを設けた試験片を用いた引張試験及び圧

* (財)日本海事協会 技術研究所

** (財)日本海事協会 研修所

縮試験（座屈試験）の結果について報告する。前報における実験条件が元厚（腐食前の板厚）10mmの実部材を用いた非常に限られたものであったことから、本報では、腐食ピットが部材強度に及ぼす影響について幅広く調査するため、部材板厚、ピットの大きさや分布を変えた多くの条件で実験を行った。また、腐食ピットが生じている部材の強度評価の際のFEM解析における形状モデリング方法について検討するために、圧縮試験（座屈試験）についてはFEM解析を実施したので、その結果についても報告する。

2. 腐食の実態調査

前報¹⁾では、船齢14年の大型ばら積み貨物船の倉内肋骨から採取された部材に発生していた腐食ピットの形状について調査した。それに引き続き、本報では、船齢12年及び20年の大型ばら積み貨物船（石炭及び鉄鉱石運搬船）の倉内肋骨に発生していた腐食ピットの形状について調査を実施した。型取り材を用いた調査の結果、前報¹⁾の場合同様に、腐食ピットの形状は円錐状であった。また、腐食ピットの直径と深さの比を図1に示す。この図には、前報¹⁾における調査結果も合わせてプロットした。この図から分かるように、ピット直径が小さい場合にはばらつきがあるものの、腐食ピットの直径と深さの比は8:1～10:1程度であった。貨物が石炭の場合に生じる典型的な腐食ピットの形状は、船の別によらず相似であった。また、腐食ピットは塗膜に生じる傷を起点として、貨物である石炭に含まれる硫黄²⁾が原因となって発生すると考えられる。以上の結果を参考にして、次章以降に述べる引張試験及び圧縮試験において用いる試験片にドリル加工により設けた人工ピットの形状は、直径と深さの比が8:1の円錐形とした。

3. 引張試験

3.1 供試材

供試材はYP32鋼であり、板厚10、14、16、19mm及び22mmの板材を用いた。その機械的性質を表1に示す。この表から分かるように、7種類のヒートを用いており、降伏点は347～457MPa、引張強さは504～555MPaであり、破断伸びは23.3～30.5%となっている。

3.2 引張試験片

小型引張試験片は、幅80mm、標点間距離200mmであり、板厚10、14、16、19及び22mmの鋼板から切り出し、ドリル加工により人工ピットを設けたものを用いた。前報¹⁾の腐食ピットが発生している実部材を用いた各引張試験片における腐食ピットの直径の平均値が25

Fig.1 Relationship between Diameter and Depth of Corrosion Pits

Table 1 Mechanical Properties of Tested Steel

Heat No.	t (mm)	Y.P. (MPa)	T.S. (MPa)	El. (%)
H1	10	381	536	28.9
H2	14	372	523	26.4
H3	16	347	516	30.5
H4	19	366	504	29.0
H5	22	360	527	30.2
H6	10	397	555	27.3
H7	10	457	507	23.3

～30mmであったことを考慮して、ピット直径は20、30あるいは40mmの3種類とし、前述の通り、ピット形状は直径と深さの比が8:1の円錐形とした。また、前報¹⁾において、実部材を用いた引張試験で破断面における引張強さを調査した結果から、腐食による鋼材そのものの引張強さの低下は見られず、板厚分布が腐食ピットの存在により変化し、これにより部材の公称引張強さが低下することが示されている。そこで、腐食部分の材質変化が強度に与える影響は少ないと考え、人工ピットは実部材における腐食ピットの幾何学的形状のみを一致させたものを採用した。一部の試験片は減厚加工することにより準備した。表2に、引張試験に用いた28種類のピット分布の内、代表的な9種類をピット個数及びピット面積率とともに示す。ここで、ピット面積率とは、試験片の標線間(80mm×240mm)における人工ピット面積の占める割合である。実部材においては、腐食ピット分布はランダムであると考えられるが、小型試験片で不規則なピット分布について検討することは、ピット及び試験片の大きさを考えると無理があることから、小型試験片では、基本的な場合として規則的なピット分布を用い、後述の幅広試験片では不規則なピット分布を用いた。また、表3に本実験で用いた75本の小型試験片の内、代表的な27本におけるヒートNo.、板厚（ピット加工前の板厚）、ピット分布及び平均減肉量を示す。

Table 2 Type of Pit Distribution in Tensile Test

No.	Pit Dia. (mm)	Number of Pits	Area Ratio of Pit
0	—	0	0.00
A-1	30	6	0.27
A-2	30	12	0.53
A-3	30	17	0.75
B-1	20	24	0.47
C-1	40	6	0.47
C-2	40	6	0.47
A-4	30	1	0.044
A-19	30	27	0.91

Table 3 Small Tensile Test Specimens

T.P.	Heat	t (mm)	Pit Distribution		Average Thickness Loss (mm)
			Side A	Side B	
AA1	H1	9.8	0	0	0.00
AA2	H1	9.7	A-1	A-1	0.66
AA3	H1	9.7	A-2	A-2	1.33
AA4	H1	9.7	A-3	A-3	1.88
AB1	H1	9.7	B-1	B-1	0.79
AB2	H1	9.6	C-1	C-2	1.57
BA1	H2	13.1	0	0	0.00
BA2	H2	13.1	A-1	A-1	0.66
BA3	H2	13.1	A-2	A-2	1.33
BA4	H2	13.1	A-3	A-3	1.88
FA5	H2	11.0	0	0	0.00
CA1	H3	16.0	0	0	0.00
CA2	H3	16.0	A-1	A-1	0.66
CA3	H3	16.0	A-2	A-2	1.33
CA4	H3	16.0	A-3	A-3	1.88
DA1	H4	21.6	0	0	0.00
DA2	H4	21.6	A-1	A-1	0.66
DA3	H4	21.6	A-2	A-2	1.33
DA4	H4	21.6	A-3	A-3	1.88
AC5	H1	9.8	A-4	A-4	0.11
BC5	H2	13.0	A-4	A-4	0.11
IA1	H5	18.6	0	0	0.00
IA2	H5	18.6	A-1	0	0.33
IA3	H5	18.6	A-2	0	0.66
IA4	H5	18.6	A-3	0	0.94
IC3	H5	18.6	A-4	0	0.06
AG1	H6	10.0	A-19	A-19	2.72
BG1	H2	13.1	A-19	A-19	2.72
IG1	H5	18.7	A-19	0	1.36

幅広引張試験片は、幅 240mm、標点間距離 400mm であり、板厚 10mm の鋼板から切り出し、ドリル加工により人工ピットを設けたものを用いた。ピット直径は小型試験片の場合と同様に 20、30 及び 40mm の 3 種類を用いた。試験片中央部の幅 240mm×長さ 200mm をピット加工領域とし、幅方向に 3 等分した領域のそれぞれに小型試験片で用いた分布のピットを配置した。本実験で用いた 5 本の幅広試験片のピット分布及びピット加工領域における平均減肉量を表 4 に示す。

3.3 破壊挙動及び変形挙動

写真 1 に破断後の小型試験片の例 (BA1～BA4) を示す。矢印は破断後の標線間を表している。この写真から

Photo 1 Tensile Test Specimens after Test (Small Specimens)

Fig.2 Relationship between Load and Displacement (Small Specimens)

Table 4 Wide Tensile Test Specimens

T.P	Heat	t (mm)	Pit Distribution			Pit Distribution			Average Thickness Loss (mm)
			Side A			Side B			
			left	center	right	left	center	right	
AW1	H6	9.7	A-1	A-2	A-3	A-3	A-2	A-1	1.29
AW2	H6	9.7	B-1	C-2	C-2	C-1	A-2	B-1	1.23
AW3	H7	9.4	B-1	A-2	C-2	B-1	A-2	C-2	1.23
AW4	H7	9.4	B-1	C-2	A-2	A-2	C-2	B-1	1.23
AW5	H7	9.4	B-1	C-2	A-2	B-1	A-2	C-1	1.23

(a) Nominal Tensile Strength

(b) Total Elongation

Fig.3 Effect of Pit on Nominal Tensile Strength and Total Elongation -1

分かるように、ピットがある場合、ピットがある断面で破断が生じており、ピットがない場合と比較して破断伸びが著しく低下していることが分かる。また、図2に荷重とクロスヘッド変位の関係を示す。この図から、ピットがある場合（BA2～BA4）は、ピットがない場合（BA1）と比較して最大荷重及び破断伸びが小さくなっていることが分かる。また、減厚加工により一様に2mm減厚したFA5においては、破断伸びの低下は生じていないことから、破断伸びの低下はピットの影響によるものであることが分かる。

3.4 強度、破断伸びに及ぼす腐食ピットの影響

試験片の両面に同じ分布の人工ピットを設けた場合の試験結果の1例を図3に示す。図3(a)は公称引張強さとピット面積率の関係である。本論文では、公称引張強さを $\sigma_{nominal} = P_{max}/A_0$ で定義する。ここで、 P_{max} 、 A_0 は、それぞれ最大荷重、人工ピットを設ける前の断面積である。

(a) Nominal Tensile Strength

(b) Total Elongation

Fig.4 Effect of Pit on Nominal Tensile Strength and Total Elongation -2

人工ピットを設ける前の断面積 A_0 は、人工ピットを設ける前の板厚に試験片の幅を掛け合わせたものである。図3(a)から分かるように、公称引張強さはピット面積率の増加とともに徐々に低下しており、その低下量は板厚が小さいほど大きくなる。また、図3(b)は破断伸びとピット面積率の関係である。この図から分かるように、ピットがある場合、破断伸びは激しく低下しており、その低下量は板厚が小さい方が大きい。

ばら積み貨物船の貨物倉においては、外板は片面のみが腐食環境にさらされるのに対して、倉内肋骨の Web は両面が腐食環境にさらされる。この点を考慮して、外板を模擬して片面のみに人工ピットを設けた板厚19mmの試験片と Web を模擬して両面に人工ピットを設けた板厚10及び13mmの試験片の結果を図4に示す。図4(a)は公称引張強さとピット面積率の関係であり、図4(b)は破断伸びとピット面積率の関係である。これらの図から分かるように、板厚が大きく片面にしか人工ピットが存在しない外板の公称引張強さ及び破断伸びの低

Fig.5 Relationship between Load and Displacement
(Wide Specimen)

Photo 2 Tensile Test Specimens after Test
(Wide Specimen)

Fig.6 Total Elongation in Wide Specimens

下量は、両面に人工ピットが存在し板厚が小さい Web の場合よりも小さいことが分かる。

人工ピットがある場合に破断伸びが低下するのは、ピットが存在するため試験片の各断面の面積が異なり、最小断面においてひずみが集中することから全体の変形量が小さくなるためと考えられる。なお、図 3(b)及び図 4(b)において、板厚が大きい場合、ピット面積率が大きくなると破断伸びが回復する傾向が見られる。これは規則的にピットが並んでいるために、ピット数が多くなる

と最小断面の数が増え、ひずみが集中する断面が多くなることが原因であると考えられる。一方、図 4(b)において板厚が 10mm の場合、破断伸びの回復の程度は小さい。これは、板厚が小さい場合、板厚に対してピット深さが大きくなり、ピット底部でのひずみ集中が板厚が大きい場合と比べて相対的に大きくなる（塑性変形する領域が小さくなる）ため、ひずみが集中する断面が多くなっても、破断伸びの回復の程度が小さくなるものと推察される。板厚 10mm の実部材の試験結果¹¹⁾においても破断伸びの回復は見られなかった。

3.5 幅広試験片を用いた実験結果

図 5 に幅広試験片の荷重とクロスヘッド変位の関係を示す。ピット加工領域におけるピット面積率は全ての試験片で一定で 0.5 であるが、AW1 と比較して AW2 では最大荷重が特に大きく低下している。これは、AW1 の場合ピット直径が 30mm で一定であるのに対して、AW2 では、写真 2 に示す丸印で囲まれた付近の両面の同じ位置に片面 2 つずつの直径 40mm の大きなピットがあるため、この部分で局所的に塑性変形が進行し、先行して破壊が生じたため最大荷重が小さくなったものと考えられる。幅広試験片では、幅方向 30mm ごとに標点を設け、1 本の試験片につき 7 箇所破断伸びを測定している。図 6 に AW1 と AW2 における破断伸びの測定結果を示す。横軸は標点の位置を試験片の端からの幅方向距離で表したものである。図から分かるように、全てのピットの直径が等しく 30mm の AW1 の場合、どの標点間においても破断伸びはほぼ一定である。それに対して、ピットの直径が幅 80mm の領域ごとに 20、30、40mm と異なる AW2 の場合、標線間に 40mm の直径が存在する図中の # で示した箇所では、破断伸びが著しく小さくなっている。図には、小型試験片で同様なピット径とピット分布を持つ試験片の破断伸びを合わせて示した。幅広試験片 AW2 におけるピット分布は、小型試験片 AB1、AA3 及び AB2 におけるピット分布を並べたものである。これらの小型試験片の破断伸びを実線で示した。この図から、AW2 で、これらの 3 つの小型試験片のうち最も破断伸びの小さい AB2 のピット分布を持つ領域の破断伸びは、AB2 の破断伸びとほぼ等しいことが分かる。また、同様に、幅広試験片 AW1 におけるピット分布は、小型試験片 AA2、AA3 及び AA4 におけるピット分布を並べたものである。これらの小型試験片の破断伸びを点線で示した。AW1 で、これらの 3 つの小型試験片のうち最も破断伸びの小さい AA2 のピット分布を持つ領域の破断伸びは、AA2 の破断伸びとほぼ等しいことが分かる。このように、幅広試験片では、破断伸びがピットの大きさや分布などの影響を受け、その位置

(a) Estimation from Area of Fracture Surface

(b) Estimation from Minimum Cross Sectional Area
Fig.7 Estimation of Maximum Load in Tensile Test

により大きく異なることから、先に破断伸びに達した箇所から局所的に破壊が生じ、最大荷重に達する。

3.6 最大荷重の予測

図7に最大荷重を予測した結果を示す。図7(a)は[破断が生じた断面の荷重軸に垂直な面に投影した負荷前の面積]×[材料の引張強さ]により最大荷重を予測したものであり、図7(b)は[荷重軸に垂直な最小断面]×[材料の引張強さ]により最大荷重を予測したものである。これらの図から分かるように、小型試験片の最大荷重は精度良く予測可能であるが、幅広試験片の最大荷重を大きく予測する場合がある。これは、前述の通り、幅広試験片の場合、破断伸びがピットの大きさや分布などの影響を受け、その位置により大きく異なることから、先に破断

Fig.8 Compression Test Specimen

Table 5 Pit Distribution in Compression Test

No.	Pit Dia. mm	Number of Pits	Area Ratio of Pit
0	—	0	0.00
D1	40	4	0.06
D2	40	4	0.06
D3	40	4	0.06
D4	40	20	0.30
D5	40	16	0.24
D6	40	1	0.015
E1	30	36	0.30
E2	30	36	0.30
E3	30	36	0.30
E4	30	36	0.30
E5	30	35	0.30
E6	30	35	0.30
E7	30	6	0.05
E8	30	18	0.15
F	—	0	0.00

Table 6 Compression Test Specimens

T.P.	Heat	t (mm)	Pit Distribution		Average Thickness Loss (mm)
			Side A	Side B	
JA1	H6	9.9	D1	0	0.10
JA2	H6	9.9	D2	0	0.10
JA3	H6	10.0	D3	0	0.10
JB1	H6	10.0	D4	D5	0.91
KB1	H3	13.2	D4	D5	0.91
JC1	H6	9.9	0	0	0.00
JD1	H6	10.2	D6	0	0.025
JE1	H6	9.9	E1	E2	0.76
JF1	H6	9.9	C	C	2.2
KF1	H3	13.0	C	C	2.2
JG1	H6	10.0	E3	E4	0.76
KG1	H6	13.2	E3	E4	0.76
JG2	H6	9.9	E5	E6	0.74
KG2	H3	13.1	E5	E6	0.74
JH1	H6	9.9	E7	E7	0.13
JH2	H6	10.0	E8	E8	0.38

伸びに達した箇所から局所的に破壊が生じるため、全断面で塑性変形が進んでから破断に至る小型試験片の場合と異なり、上記のパラメータでは最大荷重を大きく予測するものと考えられる。

4. 圧縮試験

4.1 圧縮試験体

圧縮試験体は、Web、Shell 及び Face 部材を溶接により組み立てたものを用いた。また、供試材は引張試験片と同じものを用いている。図 8 に例として Web の板厚が 10mm の場合の試験体を示す。Web 部分が供試部であり、幅 185mm、深さ 450mm である。Web の板厚は、10 及び 13mm とした。板厚 13mm の Web については板厚 16mm の鋼板を減厚加工することにより準備した。表 5 に圧縮試験体の Web 部分に用いた人工ピットの分布、個数及びピット面積率を示す。また、表 6 に圧縮試験体の Web 部分の人工ピットの分布及び平均減肉量を示す。表中の試験片 JF1 及び KF1 は人工ピットを設けずに、Web 部材の Shell 及び Face 部材に近い部分を図 9 のように減厚したものである。Web 部分のアスペクト

Fig.9 Web Plate of JF1 and KF1

Photo 3 Buckling Behavior (JG2)

比 α は 2.43 であり、板厚 10mm 及び 13mm の場合の幅厚比 β はそれぞれ 0.81 及び 0.58 である。アスペクト比 α と幅厚比 β は下式で定義される。

$$\alpha = \frac{a}{b} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2)$$

ここで、 a 、 b 及び t は、それぞれ Web の深さ、幅及び板厚であり、 σ_y 及び E はそれぞれ降伏応力及びヤング率である。

4.2 座屈挙動

写真 3 に負荷後の圧縮試験体の例 (JG2) を示す。本試験では、供試部分である Web に圧縮荷重を負荷している。この写真から分かるように、圧縮荷重を受ける Web の中央付近で座屈が生じていることが分かる。例として JG1 の荷重と荷重方向変位の関係を図 10 に、試験体中央部における横たわみと荷重の関係を図 11 示す。これらの図には、後述する FEM を用いた弾塑性大たわみ解析の結果を合わせて示す。これらの図から分かるよ

Fig.10 Load Shortening Curve (JG1)

Fig.11 Relationship between Lateral Deflection and Load (JG1)

Fig.12 Relationship between Maximum Load and Average Thickness Loss

うに、最大荷重を受けた後、荷重は急激に低下しており、また、荷重の低下とともに急激に横たわみが進行していることが分かる。

4.3 最大荷重

図 12 に圧縮試験により得られた最大荷重と平均減肉量の関係を示す。なお、この図には、前報で実施した腐食ピットが発生している実部材を用いた実験結果及び後述する FEM を用いた弾塑性大たわみ解析により得られた一様衰耗の場合の最大荷重についてもあわせてプロットしている。この図から分かるように、ピットが存在する場合の最大荷重は、一様衰耗の場合の最大荷重とほぼ同等かそれよりも小さくなっている。また、大まかな傾向としては、当然のことながら、平均減肉量が大きくなるほど最大荷重が低下している。

4.4 最大荷重に及ぼすピット位置の影響

図 13 に直径 40mm のピット 4 個を Web の片面のみに一列に並べた試験体 (板厚: 10mm, JA1~JA3) の最大荷重を示す。すなわち、この図はピットの並びを一定とした場合のピット位置が最大荷重に与える影響をまとめたものである。また、図中の実線はピットを設けていない試験体 (JC1) の最大荷重である。この図には、それぞれの試験体におけるピット分布を合わせて示してある。この図から分かるように、ピット位置が試験体の中央に近づくほど最大荷重が低下していることが分かる。ピットを設けていない試験体 (JC1) では、試験体中央部で最大横たわみを生じており、定性的には、ピット位置が大きな横たわみを生じる部分に近づくほど最大荷重が低下すると言える。

4.5 最大荷重に及ぼすピット分布の影響

図 14 に直径 30mm の直径のピットを Web の片面につき 35 ないし 36 個を設けた試験体 (板厚: 10mm, JE1, JG1, JG2) の最大荷重を示す。すなわち、この図はピ

Fig.13 Effect of Pit Location on Maximum Load

Fig.14 Effect of Pit Distribution on Maximum Load

Fig.15 Effect of Thickness on Maximum Load

ットの直径、個数をほぼ一定にした場合のピット分布が最大荷重に与える影響をまとめたものである。また、図中の実線はピットを設けていない試験体 (JC1) の最大荷重である。この図には、それぞれの試験体におけるピット分布を合わせて示してある。この図から分かるように、ピットが Web 全体に比較的均等に分布している試験体 (JG2) よりも、Web の中央部に集中している試験体 (JG1) や Web の上下部に集中している試験体 (JE1)

の最大荷重が低いことが分かる。また、この3つの試験体の Web 全体の平均減肉量はほぼ等しいことから、最大荷重は、平均減肉量のみでは決まらず、ピット分布の影響を受けると言える。

4.6 最大荷重に及ぼす板厚の影響

図15に同じピット分布の場合の板厚13mmの最大荷重(L_{13})と板厚10mmの最大荷重(L_{10})に対する比(L_{13}/L_{10})と平均減肉量の関係を示す。図中の実線は、図12に示したFEMを用いた弾塑性大たわみ解析により得られた一様衰耗の場合の最大荷重から求めたものである。一様衰耗の場合のFEM解析結果とピットや局所減肉がある試験体を用いた実験結果は、ともに平均減肉量が大きくなるほど最大荷重の比(L_{13}/L_{10})が大きくなる傾向がある。

5. 圧縮試験のFEM解析

本章では、圧縮試験において観察された座屈挙動を模擬することを目的として、弾塑性大たわみ解析を実施した。解析コードはMSC.MARCを用い、要素は板厚程度の大きさの四節点厚肉シェル要素 (Element Type 75) を使用した。前報¹⁾ではソリッド要素を用いた形状モデリング方法も検討したが、構造部材に腐食ピットが発生している場合の形状モデリング方法を検討することを目的としており、本報では、より簡便なシェル要素を用いた形状モデリング方法のみについて検討した。

5.1 材料定数と初期不整

解析に用いた材料定数は、ヤング率 $E=205.8\text{GPa}$ 、降伏応力 $\sigma_y=397\text{MPa}$ (板厚10mm)、 347MPa (板厚13mm)であり、加工硬化は無視した。

初期不整は両端固定柱の座屈モードを考え、式(3)を仮定した。

$$w = w_0 \cos \frac{2\pi}{b} y \quad (3)$$

ここで、 y 方向は Web の深さ方向であり、 $y=0$ を Web の上端とする。初期不整の最大値 w_0 については、ピットのない試験体 (板厚: 10mm、JC1) の最大荷重の実験値と計算値が合うように決定し、ピット加工する前の板厚 t_0 の $1/30$ とした。また、本解析では残留応力の影響については考慮していない。

5.2 ピットのモデリング

ピットの位置と直径、直径と深さの比 (8:1) 及びピット形状が円錐形であることから各々のシェル要素の厚さを決定した。人工ピットが試験体の両面で異なる位置に設けてある場合、ピットの存在による偏心がある。この偏心を考慮するためには、節点を板厚中心に配置すればよいが、その場合、初期不整の向きを試験体のどちらの面を凸にするようにとるかで、2通りのモデリングが

(a) JA1

(b) JG2

Fig.16 Effect of Eccentricity and Initial Imperfection on Analysis

考えられる。そこで、まず、人工ピットが試験体の両面で異なる位置に設けた試験体を例にとり、

- (1) 初期不整のみを考慮した場合
- (2) ピットの存在による偏心のみを考慮した場合
- (3) ピットの存在による偏心とA面を凸とした初期不整を考慮した場合 (Type A)
- (4) ピットの存在による偏心とB面を凸とした初期不整を考慮した場合 (Type B)

の4通りの場合について計算を実施し、ピットの存在による偏心と初期不整が解析結果に与える影響について検討した。

代表的な例として、少数のピットを片面のみに設けたJA1と多数のピットを両面に設けたJG2について、上記の4種類のモデリング方法を用いた解析により得られた荷重変位曲線を図16(a)、(b)にそれぞれ示す。各図中の実線は、それぞれの条件における最大荷重の実験値である。図16(a)から分かるように、少数のピットが片面

のみに存在する場合、上記の Type A と Type B を用いた計算結果は 2 割程度異なる。これは、ピットの存在による偏心と初期不整が打ち消し合う場合最大荷重が大きくなり、ピットの存在による偏心と初期不整が同じ方向の場合最大荷重が小さくなるためと考えられる。一方、図 16(b)から分かるように、多数のピットが両面に存在する場合、上記の Type A、Type B 及び初期不整のみを考慮した場合の解析結果に大きな差は見られず、最大荷重は実験値と非常に近くなっている。これは、試験体の両面に比較的均等にピットが存在する場合、片面のピットによる偏心の影響がもう一方の面のピットにより打ち消される傾向にあるためと考えられる。

5.3 最大荷重予測

本節では、実際の腐食した構造部材の構造解析を考えた場合、ピットによる偏心をひとつひとつ考慮するのは非常に困難であることと、実際のばら積み貨物船の倉内肋骨の Web を考えた場合、両面が腐食環境にあり、腐食ピットが多数発生している場合が問題になることを考え、ピットによる偏心は無視し、初期不整と板厚分布のみを考慮した解析を実施し、その解析精度を確認する。

上述の初期不整と板厚分布のみを考慮したモデリングを行い、各試験体の最大荷重を予測した結果を図 16 に示す。この図から分かるように、ピットの存在による偏心を無視しているため、最大荷重を若干小さめに予測してしまっている実験条件もあるが、実部材を用いた試験結果を含めて予測結果は概ね良好である。なお、一樣衰耗の場合の最大荷重の予測結果を図 12 に実験結果と合わせて示す。また、変形挙動の予測結果の例 (JG1) を図 10 及び図 11 に示した。これらの図から、荷重と荷重方向変位の関係及び試験体中央部における横たわみと荷重の関係を精度良く評価できていることが分かる。

本章では、実際のばら積み貨物船の倉内肋骨の Web に用いられている程度の板厚の鋼板に、実部材で観察される腐食ピットと同様な形状、大きさの人工ピットを設けた試験体の単純な圧縮試験結果から板厚程度の大きさのシェル要素を用い、その形状モデリング方法について検討した。その結果、ピットの存在による偏心を無視した場合でも、全体的に見るとある程度の解析精度が保たれることが分かった。なお、前述の通り、少数のピットが片面のみに存在する場合、ピットの存在による偏心を考慮すると初期不整の向きにより解析結果が 2 割程度異なる場合がある。

6. 今後の課題

本報では、人工ピットを設けた試験体を用いて引張強

Fig.17 Estimation of Maximum Load in Compression Test

度及び圧縮（座屈）強度に及ぼす腐食ピットの影響を調査するとともに、圧縮試験結果を用いて、腐食ピットを含む部材の FEM 解析を実施する際の腐食ピットの形状モデリング方法について検討した。実際のばら積み貨物船の損傷例では、肋骨全体の横倒れ座屈や肋骨下部 Web のせん断座屈や Web 及び Face の破断などが見られる場合がある¹⁰⁾。従って、構造強度という観点から考えると、倉内肋骨の曲げ部材としての強度に及ぼす腐食ピットの影響についてさらに検討を進めていく必要があると考えられる。すなわち、(1)横倒れ座屈強度、(2)Face が引張側となる場合の曲げ強度、(3)Web のせん断強度、及び(4)Web 及び Face の局部座屈強度のそれぞれについて腐食ピットの影響について調査する必要がある。上記の 4 つの検討項目のうち、Web や Face の破断により強度が決定されるような場合には、本報において検討した引張試験結果を切替え基準検討のための基礎データとして利用できるのではないかと考えられる。また、本報における圧縮試験結果及び FEM 解析結果により、上記検討項目のうち、(1)と(4)の座屈強度を FEM 解析により検討する際の腐食ピットの形状モデリング方法に関して重要な知見が得られたものと考えている。

現在、Shell、Web 及び Face 部材からなる倉内肋骨を模擬した構造物モデルを用いた試験を実施し、上記の 4 つの検討項目のそれぞれについて調査を進めている。同時に、FEM 解析を実施し、切替え基準検討のための基礎データを蓄積していく予定であり、これらの結果については次報以降で報告予定である。

7. 結 言

本研究では、船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食、特に腐食ピットの影響を明らかにすることを目的に、「腐食の形態調査」、「実部材を用いた強度調査」、「人工ピット材を用いた強度調査」及び「腐食衰耗による構造部材の局部強度の低下挙動のシミュレーション」を実施している。第2報である本報では、前報に引き続き実施したばら積み貨物船の倉内肋骨において観察された腐食ピットの形状を調査するとともに、ピット形状を模擬した人工ピット材を用いた引張強度及び圧縮（座屈）強度について調査した。さらに、腐食ピットを含む部材の強度評価をFEM解析により行う際の形状モデリング方法についての知見を得るために、圧縮（座屈）試験のFEM解析を実施した。以下に得られた主な結果を示す。

- (1) 3隻のばら積み貨物船の倉内肋骨に観察された腐食ピットの形状は、いずれの場合も円錐形をしており、その直径と深さの比は8:1から10:1であった。
- (2) 人工ピット材の公称引張強さは板厚の減少とともに徐々に低下し、平均的な衰耗による強度低下よりも低下量は大きい。また、破断伸びは板厚の減少とともに急激に低下する。これらの低下傾向は板厚が小さい方が大きい。
- (3) 小型試験片の場合、最大荷重は[破断が生じた断面の荷重軸に垂直な面に投影した負荷前の面積]×[引張強さ]あるいは[荷重軸に垂直な最小断面]×[引張強さ]で決まる。
- (4) 幅広試験片の場合、大きなピットがある部分で局所

的に塑性変形が集中してそこから先行して破壊が生じ、正味破断応力が小さくなる場合がある。

- (5) 人工ピットを含む部材の圧縮（座屈）強度は、一樣衰耗の場合とほぼ同等かそれよりも小さくなる。
- (6) 板厚程度の大きさのシェル要素を用いた解析を実施した結果、ピットの存在による偏心を無視した場合でも、人工ピットを含む部材の圧縮（座屈）強度の予測精度は良好であった。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、日本造船学会構造材料研究委員会船体構造部会（大阪大学教授・矢尾哲也部会長）及び材料・溶接部会（名古屋大学教授・宮田隆司部会長）の委員の方々から多くの御討論を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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, pp.356-365, (2003)
- 2) 検査技術部: 高齢大型ばら積み貨物船に関する調査 - 高齢大型ばら積み貨物船調査報告から -, 日本海事協会会誌, No.219, pp.79-117, (1992)
- 3) 松下久雄, 中井達郎, 山本規雄: 船体用隅肉溶接部の静的強度に及ぼす腐食衰耗の影響, 平成15年度 ClassNK 研究発表会講演集, pp.49-58, (2003)
- 4) 岡実, 北田博重, 渡辺富雄: 腐食材の静的強度に関する実験的考察, 日本造船学会論文集, 第167号, pp.229-236, (1990)