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—

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 (3rd Report)

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

Summary

The purpose of this study is to investigate the effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of bulk carriers. A series of 4-point bend tests with structural models which consist of web, shell and face plates has been conducted. Artificial pitting was made on the web plate and bending moment has been applied so that tensile load would act on the face plate. In the case of the long-span model, when pitting concentrated on the web plate near the face plate, cracks were initiated at the bottom of the pits. In the case of the short-span model, local buckling of the web plate occurred near the shell plate and the deformation behavior was strongly affected by the existence of pitting.

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

1. 緒 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腐食、特に腐食ピットの影響を調査することを目的としている。これまでに、(1)腐食の実態調査、腐食ピットの形状調査、(2)実部材と模擬腐食ピットを設けた部材を用いた引張試験、及び、(3)圧縮座屈試験を実施し、部材の基本的な強度に及ぼす腐食ピットの影響について検討するとともに、圧縮座屈試験結果をもとに、(4)FEM解析の際に用いる腐食ピットの形状モデリング方法の検討を実施してきた^{[1][2]}。

実際の倉内肋骨の損傷例を見てみると、肋骨全体の横倒れ座屈、肋骨下部ウェブの局部座屈やウェブ及びフェイスの破断などが見られる^[3]。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。

曲げを受ける部材の強度を検討する場合、一般に、(1)横座屈強度、(2)引張側フランジの強度、(3)ウェブの剪断強度、(4)各板要素の局部座屈強度、などが重要な項目であり、その他にも、(5)集中荷重に対するウェブの圧潰（web crippling）などの検討が必要な場合がある^[4]。

本報では、倉内肋骨のフェイスが引張側となるような曲げ荷重を受ける部位を想定し、断面寸法がケーブサイズバルクキャリアの倉内肋骨の約2分の1の中型構造物モデル（長さ 3,400mm）及び小型構造物モデル（長さ 720mm）を用いた4点曲げ試験を実施した。試験体のウェブにはドリル加工により模擬腐食ピットを設けて、ウェブに発生している腐食ピットが強度や変形挙動に及ぼす影響について調査した。中型構造物モデル及び小型構造物モデルを用いた実験は、それぞれ、上記の曲げ部材強度における5つの検討項目の(2)と(5)に対応する。(5)の集中荷重に対するウェブの圧潰は、主に土木関係の分野で数多くの研究が実施されている^[5]。倉内肋骨を考えた場合、これが問題になることは少ないと考えられる

* (財)日本海事協会 技術研究所

が、ウェブが局部座屈する条件で、腐食ピットが発生しているウェブを形状モデリングする方法を検討するために、中型構造物モデルを用いた実験に合わせて、ウェブが圧潰する小型構造物モデルを用いた実験を実施した。

平均的に腐食が進行している場合と比較して、凹凸が激しい腐食ピットが発生している場合の方が、FEM 解析を実施する際の部材の形状モデリングは難しいと考えられる。本研究では、腐食ピットが生じている部材の FEM 解析を行う際の形状モデリング方法の検討を目的の一つとしている。上記の2種類の構造物モデルを用いた実験に引き続いて、大きさがウェブの板厚程度のシェル要素を用いて腐食ピットを含む部材の形状モデリングを行い上記実験の FEM 解析を実施した。また、実験結果との比較からその解析精度について検討した。

なお、倉内肋骨の横倒れ座屈強度及びウェブの剪断座屈強度に及ぼす腐食ピットの影響については現在調査中であり、次報以降で報告予定である。

2. 中型構造物モデルを用いた4点曲げ試験

2.1 供試材

供試材は YP32 鋼であり、板厚 6、10、19 及び 22mm の板材を用いた。その機械的性質を表 1 に示す。この表に示すように、降伏点は 329～419MPa、引張強さは 517～561MPa であり、破断伸びは 29～32% となっている。

2.2 試験体

試験体は、ウェブ ($t=6\text{mm}$)、外板 ($t=19\text{mm}$)、フェイス ($t=10\text{mm}$) 及びリブ ($t=22\text{mm}$) をすみ肉溶接により組み立てたものを用いた。溶接脚長は、板厚 6mm 及び 22mm の母材に対して、それぞれ 4mm 及び 10mm とした。試験体の概略を図 1 に示す。断面寸法はケーブサイズバルクキャリア倉内肋骨の約 1/2 であり、ウェブ板厚 12mm、外板板厚 19mm、フェイス板厚 20mm、ウェブ深さ 450mm、フェイス幅 200mm、フレームスペース 940mm の肋骨の 1/2 モデルに対応する。ただし、外板は板厚を減じないで幅を 1 フレームスペースの 1/4 とし、断面積が 1/4 となるようにしてある。試験体の全長は 3,400mm、スパンは 3,000mm である。計 7 体の試験体を用いて試験を実施した。

2.3 模擬腐食ピット

本実験の主たる目的は、ウェブに発生している腐食ピットが強度に及ぼす影響について調査することであり、上記の試験体のウェブにドリル加工により模擬腐食ピットを設けている。模擬腐食ピットの形状は、専ら石炭と鉄鉱石を積載するバルクキャリアにおける実部材の腐食ピット形状を調査した結果¹¹⁾¹²⁾に基づき決定し、直

Table 1 Mechanical Properties of Tested Steel
(middle-sized specimens)

t (mm)	Y.P. (MPa)	T.S. (MPa)	El. (%)
6	419	561	29
10	345	517	32
19	340	538	31
22	329	532	31

Fig. 1 Middle-sized Specimen

Fig. 2 Pitted Area in Each Specimen

径 20mm、深さ 2.5mm の円錐形とした。本試験体は縮尺約 1/2 のモデルであるので、これは、実部材においては直径 40mm、深さ 5.0mm の円錐形の腐食ピットに相当する。各試験体におけるピット加工領域は図 2 に黒塗りで示した部分である。外板、フェイス及びリブで囲まれたウェブ部分を長手方向に 3 等分した領域のうち、中央の領域をピット加工領域としたものが C4-5 と C4-7 であり、右の領域をピット加工領域としたものが C4-6 である。また、中央の領域をさらにウェブの深さ方向に 3 等分した領域のうち、上段、中段及び下段をそれぞれピット加工領域としたものが、C4-2、C4-3 及び C4-4 である。また、ピット加工領域には、ウェブの両面ともにピットが設けられており、片側の面でピットが存在する位置では反対側の面でもピットが存在する。なお、C4-1 にはピットを設けていない。表 2 の試験体一覧にピット個数、ピット面積率及び局所平均減肉量をまとめて示す。ここで、ピット面積率とは、図 2 のピット加工領域においてピットが占める面積の割合であり、局所平均減肉量とは、ピット加工領域における平均減肉量である。ピット分布は図 3 に示すように各試験体とも均等分布と

Table 2 Middle-sized Specimens

No.	Pit Dia.	Number of Pits	Area Ratio of Pit	Local Average Thickness Loss
C4-1	No Pit	Side A:0 Side B:0	0.0	0.0mm
C4-2	20mm	Side A:107 Side B:107	0.45	0.75mm
C4-3	20mm	Side A:107 Side B:107	0.45	0.75mm
C4-4	20mm	Side A:107 Side B:107	0.45	0.75mm
C4-5	20mm	Side A:108 Side B:108	0.15	0.25mm
C4-6	20mm	Side A:108 Side B:108	0.15	0.25mm
C4-7	20mm	Side A:220 Side B:220	0.30	0.50mm

Fig. 3 Pit Distribution in Each Specimen

した。

2.4 試験方法

実験装置は 1,000kN 万能試験機を用い、試験体は外板側が上になるように設置して、スパン (3,000mm) を 3 等分する 2 点に外板側から集中荷重を負荷した。中央断面においては、フェイス中央部の鉛直方向変位及びウェブを深さ方向に 4 等分する 3 点で横たわみを計測した。試験体設置状況を写真 1 に示す。

3. 中型構造物モデルの 4 点曲げ試験結果

3.1 荷重変位曲線

図 4 に荷重と試験体中央下部の鉛直方向変位の関係を示す。この図から分かるように、本実験の負荷範囲内では最大荷重に達していない。そこで、それぞれの試験体の強度として、便宜的に荷重方向変位が 60mm (スパンの 1/50) に達した時点の荷重 $P_{\delta=60}$ をとり、その値を比較することにする。各試験体における $P_{\delta=60}$ を表 3 にまとめて示す。

まず、ピットが試験体のウェブ中央部 1m の範囲の上段 (外板寄り) に集中して存在する場合 (C4-2)、中段に集中して存在する場合 (C4-3) 及び下段 (フェイス寄り) に集中して存在する場合 (C4-4) を比較する。表 3

Photo 1 Test Set-up (Middle-sized Specimen)

(a) C4-1 ~ C4-4

(b) C4-1, C4-5 ~ C4-7

Fig. 4 Load-Vertical Deflection Curve for Middle-sized Specimens

Table 3 Test Results (middle-sized specimens)

No.	$P_{\delta=60}$ (kN)
C4-1	335
C4-2	320
C4-3	329
C4-4	315
C4-5	328
C4-6	333
C4-7	315

及び図 4(a)から分かるように、C4-2~C4-4 の中で最も荷重が低いものは C4-4 で、荷重 $P_{\delta=60}$ の値を C4-1 と比較すると約 6%低下している。

次に、ピットが試験体のウェブ中央部 1m の範囲に比較的均等に分布する C4-5 (ピット面積率: 0.15) と C4-7 (ピット面積率: 0.30)、及びピットがリブから 1m の範囲に比較的均等に分布する C4-6 (ピット面積率: 0.15) を比較する。表 3 及び図 4(b) から分かるように、ピット面積率が 0.15 である C4-5 及び C4-6 の場合には、ピットがない試験体 C4-1 の荷重 $P_{\delta=0}$ と比較してその低下はわずか (約 0.5~2%) である。それに対して、ピット面積率が 0.30 である C4-7 の場合には、明らかに荷重が低くなっており、 $P_{\delta=0}$ の値を C4-1 と比較すると約 6% 小さくなっている。

3.2 変形状況

実験後の試験体の例を写真 2 に示す。この写真から分かるように、試験体はフェイス側が引張、外板側が圧縮となるような曲げ荷重を受け、全体的に著しく変形している。また、写真 2(b) に実験後の試験体の中央断面を示す。ウェブ及びフェイスが外板に対して倒れるように面外変形を起こしていることが分かる。これは載荷、端部支持、試験体の不整及びピット加工の不均一性から生じているものと考えられ、フェイス側が圧縮となる場合に観察される横倒れ座屈による変形^[7]とは異なる。例として C4-7 における荷重と横たわみの関係を図 5 に示す。この図から分かるように、この面外変形は負荷開始直後から発生し始め、その変形量はフェイスに近づくほど大きくなっている。

3.3 き裂の発生

写真 3 に示すように、C4-4 及び C4-7 ではウェブのフェイス寄りに設けたピットの底部よりき裂が発生していた。上述の通り、本実験条件では、試験体のフェイス側が引張荷重を受け、外板側が圧縮荷重を受ける。また、フェイスと比較して外板の板厚、幅が大きく中立軸が外板の断面内に存在するため、ウェブ全体が曲げの引張側にある。特にフェイス寄りの部分では、大きな引張応力が発生する。そのため、フェイス寄りのウェブ上にピットがある部分では、引張荷重による大きな変形に耐えられず、ピット底部に発生する局部ひずみ集中によりき裂が発生したものと考えられる。このような曲げ部材においては、一般にフェイス部材において降伏が開始すると考えられるが、上記のように腐食ピットがウェブに発生し、特にフェイスに近い部分に集中している場合、最初に降伏が開始するのはフェイスであると考えられるものの、破壊はウェブから開始する。この点については、第 7 章で考察を加える。

4. 小型構造物モデルを用いた 4 点曲げ試験

4.1 供試材

(a) General View

(b) Cross-sectional View at Center

Photo 2 Middle-sized Specimen after Test (C4-7)

Fig. 5 Load-Lateral Deflection Curve for Middle-sized Specimen (C4-7)

(a) C4-4

(b) C4-7

Photo 3 Crack Initiation Site in Middle-sized Specimen

供試材は YP32 鋼であり、板厚 6、10 及び 19mm の板材を用いた。中型構造物モデルで用いた供試材とはヒートが異なる。その機械的性質を表 4 に示す。この表に示すように、降伏点は 331~452MPa、引張強さは 508

Table 4 Mechanical Properties of Tested Steel
(small-sized specimens)

t (mm)	Y.P. (MPa)	T.S. (MPa)	El. (%)
6	452	544	30
10	352	516	33
19	331	508	33

Fig. 6 Small-sized Specimen

Fig. 7 Pitted Area in Each Specimen

Fig. 8 Pit Distribution in Each Specimen

～544MPaであり、破断伸びは30～33%となっている。

4.2 試験体

試験体は、ウェブ（ $t=6\text{mm}$ ）、外板（ $t=19\text{mm}$ ）、フェイス（ $t=10\text{mm}$ ）及びリブ（ $t=10\text{mm}$ ）を中型構造物モデルと同様にすみ肉溶接により組み立てたものを用いた。溶接脚長は、板厚6mm及び10mmの母材に対して、それぞれ4mm及び6mmとした。試験体の概略を図6に示す。断面寸法は中型構造物モデル（図1）と同様である。試験体の全長は720mm、スパンは610mm

Table 5 Small-sized Specimens

No.	Pit Dia.	Number of Pits	Area Ratio of Pit	Local Average Thickness Loss
A4-1	No Pit	Side A:0 Side B:0	0.0	0.0mm
A4-2	20mm	Side A:77 Side B:77	0.54	0.90mm
A4-3	20mm	Side A:77 Side B:77	0.54	0.90mm
A4-4	20mm	Side A:77 Side B:77	0.54	0.90mm
A4-5	20mm	Side A:77 Side B:77	0.54	0.90mm
A4-6	20mm	Side A:77 Side B:77	0.54	0.90mm

Photo 4 Test Set-up (Small-sized Specimen)

である。計6体の試験体を用いて試験を実施した。

4.3 模擬腐食ピット

中型構造物モデルの場合と同様に小型構造物モデルの場合にもウェブにドリル加工により模擬腐食ピットを設けている。ピットの形状も中型構造物モデルの場合と同様、直径20mm、深さ2.5mmの円錐形である。各試験体におけるピット加工領域は図7に黒塗りで示した部分である。外板、フェイス及びリブで囲まれたウェブ部分を長手方向に3等分した領域のうち、右の領域をピット加工領域としたものがA4-2であり、中央の領域をピット加工領域としたものがA4-3である。外板、フェイス及びリブで囲まれたウェブ部分の上段、中段及び下段をそれぞれピット加工領域としたものが、A4-4、A4-5及びA4-6である。また、ピット加工領域には、ウェブの両面ともにピットが設けられており、片側の面でピットが存在する位置では反対側の面でもピットが存在する。なお、A4-1にはピットを設けていない。表5の試験体一覧にピット个数、ピット面積率、局所平均減肉量をまとめて示す。それぞれの試験体のピット加工領域におけるピット分布を図8に示す。

4.4 試験方法

中型構造物モデルを用いた試験と同様に、実験装置は1,000kN 万能試験機を用いて、試験体は外板が上になるように設置し、スパン（610mm）を3等分する2点に

(a) A4-1 ~ A4-3

(b) A4-1, A4-4 ~ A4-6

Fig. 9 Load-Vertical Deflection Curve for Small-sized Specimens

Fig. 10 Load-Lateral Deflection Curve for Small-sized Specimen (A4-6)

集中荷重を負荷した。中央断面においては、ウェブを深さ方向に4等分する3点で横たわみを計測した。また載荷点における荷重方向変位を測定した。試験体設置状況を写真4に示す。

Photo 5 Small-sized Specimen after Test (A4-6)
(Left: General View, Right: Cross-sectional View at Center)

Fig. 11 Local Buckling and Shear Stress in Small-sized Specimen

5. 小型構造物モデルの4点曲げ試験結果

5.1 荷重変位曲線

図9に荷重と載荷点の鉛直方向変位の関係を示す。この図には、後述するFEM解析の結果についても合わせてプロットしてある。図9(a)はA4-1~A4-3の比較であり、図9(b)はA4-1とA4-4~A4-6の比較である。載荷点の変位は計4箇所所で測定しているが、図にはその平均をとったものを示している。これらの図からいずれの場合も、最大荷重を受けた後、荷重は急激に低下していることが分かる。図9から分かるように、ピットがない場合(A4-1)と比較して、ピットがある場合の方が最大荷重が小さくなっている。また、中央部に集中している場合(A4-3)、A4-1と比較して約24%の最大荷重の低下が見られピットがウェブの端部寄りに集中している場合(A4-2)の低下(約8%)よりも、最大荷重の低下が顕著である。また、ピットが外板側及び中央部に集中している場合(A4-4及びA4-5)、A4-1と比較して約25%の最大荷重の低下が見られ、フェイス側に集中している場合(A4-6)の低下(約6%)よりも最大荷重の低下が顕著である。

5.2 横たわみの発生状況

横たわみと荷重の関係を図10に示す。この図には、後述するFEM解析の結果についても合わせてプロットしてある。この図から分かるように、最大荷重を受けた後、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。写真5に試験後の試験体を示す。この図

Table 6 Work Hardening Modulus Used in Analysis

t (mm)	H'	
	S*	M**
6	E/120	E/90
10	E/90	E/90
19	E/80	E/75
22	-	E/75

* S: small-sized specimens

** M: middle-sized specimens

Fig. 12 Geometrical Model for Small-sized Specimen

Fig. 13 Assumed Initial Imperfection in Web Plate of Small-sized specimen

から分かるように、ウェブで局部座屈が生じており、最大横たわみは、ウェブの中央部よりも上寄り（外板寄り）の部分で生じている。

5.3 最大荷重、変形挙動に及ぼすピットの影響

FEM 解析結果によると、図 11 の斜線で示す領域では剪断応力が非常に大きくなる。また、試験結果及び FEM 解析結果によると、楕円で示す領域では、集中荷重により局所的に大きな圧縮応力が発生し、座屈時に大きな横たわみが発生する。上述の試験結果（図 9(a)）を見ると、剪断応力が高い領域にピットが集中する場合（例えば A4-2）、荷重変位関係が直線関係から外れるのが早くなる。また、大きな圧縮応力が発生し、大きな横たわみが発生する領域にピットが集中する場合（例えば A4-3）、最大荷重に至るまでの変形量が小さくなる。

6. FEM 解析

6.1 解析条件

FEM を用いた弾塑性大たわみ解析を実施した。使用した解析コードは MSC.Marc であり、要素は四節点厚肉シェル要素 (Element Type 75) を用いた。解析に用いた材料定数は、ヤング率 $E=205.8\text{GPa}$ 、降伏応力 σ_y は表 1 及び表 4 の通りであり、加工硬化率 H' は表 6 に示すとおりである。小型構造物モデルの解析に用いた形状モデルを図 12 に示す。本解析で問題となるのは、ピットが存在するウェブのモデリング方法であるが、本モデルでは、ウェブは一辺の長さが板厚程度の大きさ（一

(a) C4-1, C4-4

(b) C4-1, C4-7

Fig. 14 Load-Vertical Deflection Curve for Middle-sized Specimens

辺の長さが約 6mm) のほぼ正方形の要素でモデリングしている。中型構造物モデルの解析に用いた形状モデルについては、ピットが存在する領域及びその近傍については、小型構造物モデルの場合と同様に一辺の長さがウェブの板厚程度の要素を用いたが、それ以外の領域のウェブは深さ 225mm を 10 等分したモデルを用いた。各々の要素の厚さについては、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計算し、要素の構成する各節点における板厚の平均値をその要素の板厚とした。

6.2 初期たわみ

一般に、工作時に生じる初期たわみの分布は複雑であると言われているが、実験で観察された座屈形状を参考にして、小型構造物モデルについてはリブ間のウェブに図 13 に示すような形状の初期たわみを与えた。なお、図 13 は初期たわみの大きさを 100 倍して表示している。初期たわみの最大値 w_0 は板厚 t (6mm) の 1/10 (ウェブ深さ (225mm) の 1/375) とした。これは、ピットのない試験体 A4-1 の最大荷重の実験値と計算値が合うよう

に決定した。なお、初期たわみを考慮したのは座屈挙動が観察された小型構造物モデルの場合のみであり、中型構造物モデルの場合は考慮していない。また、両モデルとも、溶接による残留応力については考慮していない。

6.3 解析結果

6.3.1 中型構造物モデル

図14に、荷重と試験体中央下部の鉛直方向変位の関係を予測した結果を示す。図14(a)には、C4-2～C4-4の実験結果で最も荷重の低いC4-4とピットのないC4-1の実験結果及び解析結果を示す。図14(b)には、C4-5～C4-7の実験結果で最も荷重の低いC4-7とピットのないC4-1の実験結果及び解析結果を示す。これらの図から分かるように、変形挙動を精度良く予測可能であることが分かる。

6.3.2 小型構造物モデル

実験結果と解析結果を比較するために、図9に各試験条件における荷重と載荷点の鉛直方向変位の関係を示した。また、最大荷重の実験値と解析結果の比較を図15に示す。図9から分かるように、最大荷重時の変形量を小さく見積もる傾向があるものの、図15から分かるように、各試験条件で最大荷重を概ね良好に予測可能であることが分かる。ここに、最大荷重の予測値の実験値からのずれは絶対値で3～12%である。また、試験体中央断面のウェブにおける横たわみと荷重の関係の予測結果を図10に示した。この図から分かるように、横たわみについても精度良く予測できていることが分かる。

以上の結果から、ウェブに腐食ピットが発生している場合のFEM解析の際に、ウェブの元厚（腐食ピットが発生する以前の板厚）程度の大きさのシェル要素を用いれば、解析精度はほぼ保たれることが分かった。

7. 考 察

ここでは、バルクキャリア倉内肋骨のフェイス側が引張となるような曲げを受ける部位における強度について、上述の中型構造物モデルを用いた実験及びFEM解析結果をもとに考察する。

曲げ部材の曲げ抵抗は主にフランジ（フェイス）で受け持たれており、ウェブは曲げと剪断を受けるが、実質的には剪断に対する耐荷力を負担することを求められている¹⁰⁾。図16に前章で示したピットを設けていない中型構造物モデル（C4-1）に合わせて、フェイスのみに25%の一樣衰耗がある場合、ウェブのみに25%の一樣衰耗がある場合、及び、フェイスとウェブの両方ともに25%の一樣衰耗がある場合の荷重変位曲線（いずれもFEM解析結果）を示す。この図から分かるように、ウ

Fig. 15 Estimation of Ultimate Strength for Small-sized Specimens

Fig. 16 Estimated Load-Vertical Deflection Curve for Middle-sized Specimens

ェブのみに衰耗がある場合には、荷重変位関係が直線関係から外れる荷重はほとんど変化しないのに対して、フェイスが衰耗している場合には、直線関係から外れる荷重が低くなる。しかしながら、荷重変位関係が直線から外れた後を見ると、ウェブのみに衰耗がある場合とフェイスのみに衰耗がある場合と大きな差は見られない。このことから、塑性変形を防止するのにはフェイスの板厚確保が重要であるが、曲げ部材の降伏後の最終強度を確保するためには、ウェブの板厚確保も同じく重要であると考えられる。

文献[9]では、H形鋼で局部座屈も横座屈も起こさずに大変形が可能な場合の塑性変形能力を決定する要因の一つとして引張側フランジの延性破壊が挙げられている。写真3に示したように上述の中型構造物モデルを用いた実験では、ウェブ上のフェイス寄りの部分にピットが集中する場合に、フェイスで大変形が生じる前に、ウェブにおいてき裂発生が観察された。ウェブは、フェイスや外板と比較して板厚が小さいため、ピットが存在す

る場合、破断伸びが著しく小さくなる^{11,12)}。そのため、フェイスが引張荷重による大変形を起こす前に、ピットが存在するウェブから先にき裂が発生したものと考えられる。この実験結果は、曲げ部材においてウェブに腐食ピットが発生している場合、ウェブからの破壊が最終強度を決定する要因になり得ることを示唆するものである。このような破壊モードは、基本的には、腐食ピットが発生しているウェブの引張強度を検討すれば良いことから、文献[1]及び[2]の試験結果をウェブの切替基準検討のための基礎データとして利用できると考えられる。

以上のように、ウェブの板厚確保は部材の降伏後の強度の確保に重要である。また、ウェブにおける腐食ピットの防止は、ウェブから破断が開始するのを防ぐのに重要であると考えられる。

8. 今後の課題

これまでに、バルクキャリア倉内肋骨の局部強度に及ぼす腐食ピットの影響を調査するために、既報^{11,12)}では基本的な機械的性質として、引張強度及び圧縮座屈強度について検討した。また、本報においては、フェイス側が引張となるような条件における曲げ強度について検討した。今後は、さらに、実際の損傷例¹³⁾で見られる肋骨全体の横倒れ座屈やウェブの局部的な剪断座屈に及ぼす腐食ピットの影響について調査を進めていく必要があると考えている。

9. 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」、「模擬腐食ピットを有する部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。その結果今までに、主に以下のことが明らかとなっている。

- (1) 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は、直径と深さの比が8:1~10:1の円錐形である。
- (2) 腐食ピットが発生している部材の公称引張強さは板厚の減少とともに徐々に低下する。また、破断伸びは板厚の減少とともに急激に低下する。
- (3) 腐食ピットが発生している部材の圧縮座屈強度は、一様衰耗の場合とはほぼ同等がそれよりも小さくなる。
- (4) 板厚程度の大きさのシェル要素を用いた FEM 解析

により、腐食ピットが発生している部材の圧縮座屈強度を精度良く予測可能である。

第3報である本報では、ピット形状を模擬した模擬腐食ピットを有する、断面寸法がケーブサイズバルクキャリアの倉内肋骨の約2分の1の中小構造物モデルを用いた4点曲げ試験を実施した。さらに、腐食ピットを含む部材の強度評価を FEM 解析により実施する際の形状モデリング方法についての知見を得るために、上記試験の FEM 解析を実施した。以下に得られた主な結果を示す。**中型構造物モデルを用いた4点曲げ試験結果**

- (1) ウェブにピットが存在する場合、ピットが存在しない場合と比較して荷重は低くなる。また、引張側であるフェイス寄りにピットが集中する場合に荷重の低下が顕著になる。
- (2) ウェブ中央部のフェイス寄りにピットが集中する場合、ピット底部からのき裂発生が見られる。

小型構造物モデルを用いた4点曲げ試験結果

- (3) 最大荷重を受けた後、ウェブの座屈を伴い、荷重は急激に低下する。
- (4) 最大座屈たわみはウェブの中央外板寄りの部分で発生する。
- (5) ウェブ上の剪断応力が高い領域にピットが集中する場合、荷重変位関係が直線関係から外れるのが早くなる。
- (6) ウェブ上の大きな横たわみが発生する領域にピットが集中する場合、最大荷重に至るまでの変形量が小さくなる。

FEM 解析結果

- (7) 大きさがピットを設ける前の板厚程度のシェル要素を使ってピットが存在するウェブをモデリングすることにより、中小構造物モデルを用いた4点曲げ試験で見られた変形挙動を精度良く予測可能である。

以上の検討結果から、以下のことが言える。

- (8) ウェブの板厚確保は部材の降伏後の強度の確保に重要である。また、ウェブにおける腐食ピットの防止は、ウェブから破断が開始するのを防ぐのに重要である。

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(2002), pp.356-365
- 2) 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), 掲載予定

- 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, (2003), pp.49-58
- 4) 例えば, 桑村仁, 鋼構造の性能と設計, 共立出版株式会社, (2002), pp.132
- 5) 例えば, Roberts, T. M. and Newark, A. C. M. : Strength of Web Subjected to Compressive Edge Loading, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 123, No.2(1994), pp.176-183
- 6) 中井達郎, 松下久雄, 山本規雄, 荒井宏範: バルクキャリア倉内肋骨の腐食実態と強度, 検査技術,

Vol.9, No.3(2004), pp.38-43

- 7) 例えば, 新田顕: 桁板構造の最終強度に関する研究(その3) - 桁の横倒れ不安定現象について -, 日本造船学会論文集, 第127号(1970), pp.181-205
- 8) 例えば, 伊藤学, 鋼構造学, コロナ社, (1999), pp.163
- 9) 鈴木敏郎, 小河利行, 五十嵐規矩夫, 小幡学: フランジ幅厚比の小さな高張力鋼梁の塑性変形性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第486号(1996), pp.115-123