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—

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 (6th Report)

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

Summary

The aim of this study is to investigate the effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of bulk carriers. In the present study, a series of 3-point bend tests with small structural models which consist of web, shell and face plates has been conducted. Artificial pitting was made on the web plate. In these tests, a concentrated load has been applied at the center of simply supported models so that shear load would act on the web plate. In this testing condition, load increased even after shear buckling occurred. When there is artificial pitting, fracture of web occurs. While no fracture is observed when there is no pitting. It has been revealed that shear buckling load and ultimate load decreases gradually and maximum vertical deflection decreases drastically with the increase of area ratio of pitting. As a result of non-linear FE-analyses, shear buckling load of the structural models where pitting prevailed uniformly on the web plates was found to be almost the same as that of the structural models where the web plates have uniform corrosion corresponding to the average thickness loss.

1. 緒 言

船体構造部材は就航後、腐食環境にさらされ、腐食による部材板厚の減少などの経年劣化は避けられないことから、腐食は船舶の寿命を決定する要因のひとつと考えられている^[1]。それゆえ、船体構造の安全性を確保するためには、腐食のプロセスを理解し、腐食衰耗の全体強度に及ぼす影響のみならず、局部強度に及ぼす影響も的確に評価する必要がある。

このような観点から、著者の一人は腐食の発生と進行過程を定量的に評価することのできる腐食の確率モデルを開発し^[2]、本モデルを用いて船体構造における主要強度のひとつであるハルガーダー縦強度の腐食による低下について検討している^[3]。全体強度に及ぼす腐食の影響が検討されている一方で、船体構造部材や各部材を構成する板要素の強度に及ぼす腐食の影響に関する研

究は、文献[4]～[8]などに見られる。また、土木構造物などの分野においても、部材強度に及ぼす腐食の影響については、その重要性から、近年研究例が増えてきているようである。例えば、腐食鋼板の表面形状に関する研究^{[9]～[12]}、腐食材の引張強度や座屈強度に関する研究^{[13]～[17]}や実際の腐食した構造部材や腐食を模擬した構造部材の強度に関する研究^{[18]～[22]}などがある。以上のような研究例があるものの、腐食の実態、部材を構成する板要素レベルの強度に及ぼす腐食の影響、及び、構造部材レベルの強度に及ぼす腐食の影響について系統的に調査した例は少ないようである。

全面腐食と局部腐食は船体構造部材に見られる典型的な腐食として挙げられるが、石炭と鉄鉱石を運搬するバルクキャリア貨物倉倉内肋骨には、局部腐食の一形態である凹凸の激しい腐食ピットが板表面に発生する場合がある^{[23],[24]}。全面腐食のように平均的に腐食が進行している場合と比較して、凹凸の激しい腐食ピットが発生している場合、表面凹凸状態の影響を考慮する必要があるため、残存強度の評価が難しいと考えられる。このため、IACS 統一規則 S-31^[25]で、腐食ピットが発生している場合を含めた倉内肋骨の切替え基準が規定されてい

* (財)日本海事協会 技術研究所

原稿受理 平成16年12月14日

るものの、腐食ピットの程度と残存強度の関係については十分に明らかにされているとは言えない状況にある。そこで、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し、切替え基準を検討するための基礎データを取得することを目的としている。第1報^[23]及び第2報^[24]では、(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、単純な荷重条件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を検討した。

すでに単純な荷重条件（引張、圧縮）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明らかにしてきたが、さらに構造強度に腐食ピットがどのような影響を及ぼすかを明らかにするために、構造強度、すなわち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、現在、検討を進めている。曲げを受ける部材の強度を検討する場合、一般に、(1)座屈を生じない場合の崩壊強度、(2)横倒れ座屈強度、(3)各板要素の局部座屈強度、(4)ウェブのせん断強度、などが主な検討項目であり、さらに(5)集中荷重に対するウェブの圧壊（web crippling）などの検討が必要な場合がある^[26]。

第3報^[27]では、上記の(1)及び(5)に及ぼす腐食ピットの影響を調べるために、断面寸法がケーブサイズバルクキャリア倉内肋骨の約2分の1の構造物モデルを用いて、フェイスが引張側となるような4点曲げ試験を実施した。その結果、ウェブ上のフェイス寄りの部分に腐食ピットが集中する場合、腐食ピット底部からのき裂の発生が見られることがあり、ウェブにおける腐食ピットの防止は、腐食ピットを起点としたウェブからの破断を防ぐのに重要であることやウェブの圧壊強度は腐食ピットの分布の影響を強く受けることなどを示した。

第4報^[28]と第5報^[29]では、それぞれ上記の(2)と(3)に及ぼす腐食ピットの影響を検討するために、第3報^[27]と同様な断面寸法を持つ構造物モデルを用いてフェイスが圧縮側となるような4点曲げ試験（横倒れ座屈試験）及び3点曲げ試験（局部座屈試験）を実施した。その結果、ウェブにピットが均等に存在する場合の最終強度は、その平均衰耗量に対応する一様衰耗の場合の最終強度とほぼ等しいことなどを明らかにした。

第6報である本報では、上記の(4)ウェブのせん断強度に及ぼす腐食ピットの影響について検討した結果を報告する。よく知られている通り、ウェブのせん断強度については古くから数多くの研究がなされている^{[30]~[36]}が、腐食による強度低下の観点から研究が実施された例は少ないようである^[20]。既報^{[27]~[29]}と同様な断面寸法を持つ構造物モデルを用いて、3点曲げ試験（せん断座屈試験）を実施した。ウェブにはドリル加工により模擬腐食ピットを設けて、ウェブのせん断座屈挙動に及ぼす腐食ピッ

トの影響について調査した。本報の最大の目的は、ウェブのせん断強度に及ぼす腐食ピットの影響について明らかにするとともに、一様衰耗の場合との違いについて検討することにある。実験に引き続いてFEM解析を実施し、その解析精度を確認するとともに、一様衰耗の場合についてもせん断座屈強度を求め、腐食ピットがある場合のせん断座屈強度との比較検討を実施した。

2. 小型構造物モデルを用いた3点曲げ試験

2.1 供試材

供試材は、YP32鋼であり、既報^{[28]、[29]}で用いたものと同じ板厚5、6、10、19及び22mmの板材を用いた。ここで、板厚5mmの板材は板厚6mmの板材を減厚加工することにより準備した。供試材の機械的性質をTable 1に示す。この表に示すように、降伏点は346~404MPa、引張強さは535~578MPaであり、破断伸びは30~32%である。

2.2 試験体

試験体は、ウェブ（ $t=5\text{mm}$ あるいは 6mm ）、外板（ $t=19\text{mm}$ ）、フェイス（ $t=10\text{mm}$ ）及びスティフナ（ $t=22\text{mm}$ ）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5mm、6mm及び22mmの母材に対して、それぞれ3mm、4mm及び10mmとした。試験体の概略をFig.1に示す。試験体の断面寸法は、ウェブ板厚10mmあるいは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及びフレームスペース940mmのケーブサイズバルクキャリア倉内肋骨の縮尺約1/2に対応する。なお、外板は板厚19mmのままとし、幅を1フレームスペースの1/4と

Table 1 Mechanical Properties of Tested Steel

t (mm)	Y.P. (MPa)	T.S. (MPa)	El. (%)
6	404	578	31
10	359	555	30
19	346	540	30
22	356	535	32

Fig. 1 Test Specimen

Fig. 2 Pitted Area in Each Specimen

Table 2 Artificial Pitting in Each Specimen

No.	Thick-ness (mm)	Number of Pits		Area Ratio of Pit	Local Average Thickness Loss	
		A	B		mm	%
G3-1	6	0	0	0.0	0.0	0.0
G3-2	6	13	13	0.06	0.10	1.7
G3-3	6	32	32	0.15	0.24	4.1
G3-4	6	59	59	0.27	0.45	7.0
G3-5	6	111	111	0.51	0.85	14.1
H3-1	5	0	0	0.0	0.0	0.0
H3-3	5	32	32	0.15	0.24	4.9
H3-4	5	59	59	0.27	0.45	9.0
H3-5	5	111	111	0.51	0.85	16.9
H3-6	5	35	35	0.48	0.80	5.3
H3-7	5	35	35	0.48	0.80	5.3
H3-8	5	35	35	0.48	0.80	5.3

Fig. 3 Pit Distribution in Each Specimen

して、断面積が 1/4 となるようにしてある。試験体の全長は 720mm、スパンは 610mm であり、載荷点となるスパン中央にスティフナが設けられている。Fig.1 において、試験体中央から右側の外板、フェイス及びスティフナで囲まれた長さ 305mm のウェブ部分を供試部としている。計 12 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、腐食ピットがウェブのせん断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、石炭と鉄鉱石を運搬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^{[23],[24]}に基づき決定し、直径 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 Fig.2 に黒塗りで示した部分

Photo 1 Test Set-up

である。また、最も厳しい場合を想定し、ピット加工領域には、ウェブの表裏面の同じ位置に同じ形状のピットが設けられている。なお、G3-1 及び H3-1 にはピットを設けていない。Table 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、Fig.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 Fig.3 に示すように各試験体とも均等分布とした。

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 (610mm) を 2 等分する点に外板側から集中荷重を負荷した。試験体中央断面においては外板中央部の鉛直方向変位を、供試部中央部から 15mm 外側の断面すなわち Fig.1 で試験体中央から右側へ 167.5mm 離れた断面においては、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。試験体設置状況を Photo 1 に示す。

3. 小型構造物モデルを用いた 3 点曲げ試験結果

3.1 荷重—変位関係

供試部のウェブの板厚 (t_0) を 6mm とした G3 シリーズ及び供試部のウェブの板厚 (t_0) を 5mm とした H3 シリーズの荷重と試験体中央下部の鉛直方向変位の関係を Fig.4(a)及び(b)にそれぞれ示す。この図には、 $P-\delta^2$ 法^[31]により求めたせん断座屈荷重を合わせて○印で示してある。また、破断が生じた時点を×印で示してあり、最大変位時以降の矢印 (→) は本実験の載荷範囲内で破断が生じなかったことを示している。なお、ピットが部分的に集中している H3-6~H3-8 のデータはプロットしていない。これらの図から分かるように、負荷開始直後は、荷重と変位の関係は直線関係にあるが、荷重増加とともに両者の関係は直線関係から外れ、せん断座屈が発生すると勾配が小さくなるものの荷重は増加し続ける。その後、ウェブにピットを設けてある試験体では、ウェブの破断が生じる。また、ウェブにピットを設けていない試験体 (G3-1 及び H3-1) では、荷重はほぼ一定値となり変形し続け、本実験の載荷範囲内ではウェブの破断は生

(a) $t_0=6\text{mm}$ (b) $t_0=5\text{mm}$

Fig. 4 Load-Vertical Deflection Curves

(a) Experiment

(b) FE-Analysis

Fig. 5 General View of Specimen After Test (H3-1)

じなかった。本実験で用いた試験体では、ウェブ周辺の外板、フェイス及びスティフナからなる枠組みの剛性が高く、せん断座屈後も荷重が低下せず、斜張力場^[30]が形成されると考えられる。その後、ウェブにピットが存在する場合には、破断伸びが著しく低下している^{[23][24]}ため、斜張力場に働く引張荷重により破断に至るものと考えられる。ピットが存在するウェブの引張強度特性については、第6章で詳しく述べる。

3.2 崩壊モード

実験後の試験体の例として、ウェブにピットを設けて

(a) G3-2 (left: tested section, right: enlargement)

(b) G3-5 (left: tested section, right: enlargement)

Photo 2 Buckling and Fracture of Web

Table 3 Results of Test and FE-Analysis

No.	P_u * (kN)	$\delta_{\max}$ ** (mm)	P_{sb} *** (kN)	
	Exp.	Exp.	Exp.	FEM
G3-1	961 ^a	64.4	906	826
G3-2	919 ^b	50.0	891	799
G3-3	852 ^b	38.1	792	774
G3-4	810 ^b	33.8	716	736
G3-5	695 ^b	19.5	614	660
H3-1	900 ^a	50.0	760	697
H3-3	740 ^b	25.2	684	656
H3-4	644 ^b	18.3	582	624
H3-5	558 ^b	10.6	529	542
H3-6	747 ^b	29.3	673	647
H3-7	746 ^b	24.5	666	640
H3-8	780 ^b	32.8	649	654

Note

* P_u : ultimate load

** $\delta_{\max}$: maximum vertical deflection

*** P_{sb} : shear buckling load determined by P- δ^2 method

^a Load at vertical deflection of 50mm is regarded as P_u .

^b web fracture

いない試験体 H3-1 の全体図を Fig.5(a)に示す。Fig.5(b)は、後述する FEM 解析による変形状況を示したものである。Fig.5(a)から分かるように、供試部 (図の左側) のウェブはせん断座屈しており、試験体全体が大きく変形している。ウェブにピットを設けた試験体の例として、G3-2 及び G3-5 の供試部を Photo 2(a)及び(b)にそれぞれ示す。各図の左側には供試部の全体写真を、右側にはウェブ破断部の拡大写真を示す。これらの写真から分かるように、ウェブに発生すると考えられる斜張力場に対して垂直に近い方向に並ぶピットに沿ってき裂が発生して破断に至ることが分かる。ウェブにピットを設けている試験体では、ピットの多少によらず全ての試験体でウェブが破断に至った。

3.3 最終強度、変形挙動に及ぼすピットの影響

Table 3 に各試験体における最終強度 P_u 、試験体中央下部の鉛直方向最大変位 $\delta_{\max}$ 及びせん断座屈荷重 P_{sb} をまとめた。また、せん断座屈荷重 P_{sb} については、後述

Fig. 6 Ultimate Load and Shear Buckling Load

Fig. 7 Relationship between $\delta_{\max}$ and Area Ratio of Pit

Fig. 8 Effect of Pit Location on Ultimate Load and Shear Buckling Load

する FEM 解析により求めた値についてもまとめている。ここで、せん断座屈荷重は $P\text{-}\delta^2$ 法により求めた値である。Fig. 6 に実験により得られた最終強度及びせん断座屈荷重とウェブのピット面積率の関係を示す。Table 3 及び Fig. 6 から分かるように、最終強度、せん断座屈荷重ともにピット面積率が大きくなるにつれて徐々に低下する。

Fig. 7 に試験体中央下部の鉛直方向最大変位とピット面積率の関係を示す。この図から分かるように、ピット面積率が大きくなると鉛直方向最大変位が急激に小さくなる傾向があることが分かる。すなわち、ピットの個数が増えると破断に至るまでの変形量が小さくなる。また、この傾向はウェブの板厚が小さい場合の方が大きい。

Fig. 8 にピットの大きさ、ピットの個数及びピット面積

Table 4 Work Hardening Modulus Used in Analysis

t (mm)	H'
6	E/85
10	E/75
19	E/70
22	E/80

Fig. 9 Geometrical Model

率を一定にして、ピット加工領域を変えた3つの試験体 H3-6、H3-7 及び H3-8 の最終強度、せん断座屈荷重及び鉛直方向最大変位の実験値を比較した結果を示す。この図から分かるように、3つの試験体の最終強度、せん断座屈荷重及び鉛直方向最大変位の実験値に大きな差は見られなかった。

4. FEM 解析

4.1 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 Table 1 の通りであり、加工硬化率 H' は Table 4 に示す通りである。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、ウェブを一辺の長さが板厚程度の大きさ (一辺の長さが約 6mm) のほぼ正方形の要素でモデリングしている。解析に用いた形状モデルの全体図を Fig. 9 に示す。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直径:深さ=8:1 の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。

4.2 初期たわみ

一般に、工作时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。上述の実験では、いずれの試験体においても、初期たわみを計測していないため、その形状については不明である。せん断座屈に及ぼす初期たわみの影響については別途調査が必要であると考えられるが、本解析では、せん断座屈に及ぼすピットの影響のみを検討することを目的として、全試験体の供試部のウェブに下式に示すような単純な初期たわみ w を与えた。

$$w = w_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (1)$$

ここで、 a, b, x 及び y は Fig. 9 に示す通りである。このよ

Fig. 10 Prediction of Load-Vertical Deflection Curves

Fig. 11 Prediction of Shear Buckling Load

Fig.12 Relationship between Shear Buckling Load and Average Thickness Loss

うな初期たわみを与えることにより、Fig.5 に示したように、実験で観察されたのと同様な崩壊モードが得られる。また、初期たわみ w の最大値 w_0 はピットを設ける前のウェブの板厚 t_0 の $1/10$ とした。なお、本解析では残留応力の影響については考慮していない。

4.3 解析結果

4.3.1 荷重-変位関係の予測結果

Fig.10 にピットを設けていない試験体 H3-1 と設けたピットの個数が最も多く、H3-1 と比較して最終強度の低

下が最も大きい H3-5 の荷重と試験体中央下部の鉛直方向変位の関係の予測結果をそれぞれ示した。この図には、P- δ^2 法により求めたせん断座屈荷重をあわせてプロットした。この図から、解析においても、実験と同様なせん断座屈後の耐力の増加挙動が見られることが分かる。

4.3.2 せん断座屈荷重の予測結果

本実験条件では、せん断座屈後に耐力の上昇が見られるが、せん断座屈により最終強度が決まるケース^[36]もあることなどを考えると、せん断座屈荷重の予測は非常に重要である。Fig.11 に FEM によるせん断座屈荷重の解析結果を示す。本解析では、実際の試験体の初期たわみを考慮していないものの、得られたせん断座屈荷重の解析値の実験値からのずれは、絶対値で 10%以内であり、せん断座屈荷重に及ぼすピットの影響をある程度表現出来ているものと考えられる。

4.3.3 ピットの形状モデリングについて

上記で用いたピットのモデリング方法の妥当性については、既報^[23]で、腐食ピットの発生している部材の圧縮座屈試験結果を用いて、ソリッド要素によるモデリングとの比較から検討しているが、その妥当性についてはさらに検討の余地がある。今後、ピット部をさらに細かなメッシュでモデル化した場合との比較などから妥当性を検討する必要があると考えている。

5. 一様衰耗の場合との比較

実験結果から分かるように、ウェブにおけるピットが多くなるほど最終強度及び座屈荷重は低下する傾向にある。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、残存強度の評価が難しい。ここでは、追加の FEM 解析を実施し、平均的に腐食が進行する一様衰耗の場合と腐食ピットが発生している場合の強度について比較する。ウェブにピットが設けられている場合、ウェブの破断により最終強度が決まるため、FEM 解析による最終強度の推定が困難であることから、ここでは、ウェブのせん断座屈荷重について、腐食ピットが発生している場合と一様衰耗の場合を比較する。ウェブに均等にピットが設けられている場合の実験結果とウェブが一様衰耗している場合の FEM 解析結果をせん断座屈強度とウェブ衰耗率の関係で Fig.12 に示す。この図から分かるように、ウェブにピットが均等に存在する場合のせん断座屈強度は、そのピット領域の平均衰耗量に対応する一様衰耗であると仮定しても、ピットの存在によるせん断座屈荷重の低下挙動をある程度表現できることが分かる。

6. 引張強度特性との関連

前章までに、ウェブにピットが存在する場合のせん断強度特性について検討した。本章では、3 点曲げ試験で用いたウェブと同じ板厚をもつ試験片に模擬腐食ピッ

Table 5 Type of Pit Distribution in Tensile Test

No.	Pit Dia. (mm)	Number of Pits	Area Ratio of Pit
A-1	-	0	0.00
A-2	20	6	0.25
A-3	20	12	0.51
A-4	20	17	0.72
C-5	20	1	0.04
G-1	20	27	0.90

Table 6 Small Tensile Test Specimens

T.P.	t (mm)	Pit Distribution		Average Thickness Loss (mm)
		Side A	Side B	
LA1	6	A-1	A-1	0.00
LC5	6	C-5	C-5	0.07
LA2	6	A-2	A-2	0.42
LA3	6	A-3	A-3	0.85
LA4	6	A-4	A-4	1.20
LG1	6	G-1	G-1	1.76
MA1	5	A-1	A-1	0.00
MC5	5	C-5	C-5	0.07
MA2	5	A-2	A-2	0.42
MA3	5	A-3	A-3	0.85
MA4	5	A-4	A-4	1.20
MG1	5	G-1	G-1	1.76

トを設けて引張試験を実施し、引張強度特性に及ぼすピットの影響とそのせん断強度特性との関連について述べる。

6.1 供試材

供試材は、YP32 鋼であり、前述した 3 点曲げ試験で用いた小型構造物モデルのウェブと同じ板厚 5mm 及び 6mm の板材を用いた。ここで、板厚 5mm の板材は板厚 6mm の板材を減厚加工したものである。本材の降伏点は 404MPa、引張強さは 578MPa、破断伸びは 31% である。

6.2 引張試験片

引張試験片は、幅 55mm、標点間距離 135mm であり、板厚 5mm 及び 6mm の鋼板から切り出し、ドリル加工により模擬腐食ピットを設けたものを用いた。小型構造物モデルの場合と同様に、模擬腐食ピットの直径は 20mm とし、直径と深さの比が 8:1 の円錐形とした。Table 5 に、引張試験に用いた 6 種類のピット分布におけるピット個数及びピット面積率を示す。ここで、ピット面積率とは、試験片の標線間 (55mm×135mm) における模擬腐食ピットの面積の占める割合である。また、Table 6 に本実験で用いた 12 本の試験片の板厚 (模擬腐食ピット加工前の板厚)、ピット分布及び平均減肉量を示す。

6.3 引張強度、破断伸びに及ぼす腐食ピットの影響

公称引張強さと平均減肉率の関係を Fig.13 に示す。この図には、既報^[23]における実腐食部材 (船齢 14 年、元

Fig. 13 Relationship between Average Thickness Loss and Nominal Tensile Strength

Fig. 14 Relationship between Average Thickness Loss and Total Elongation

厚 10mm、腐食ピット平均直径 25~30mm) の実験結果をあわせてプロットしてある。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、模擬腐食ピットを設ける前の断面積である。模擬腐食ピットを設ける前の断面積 A_0 は、模擬腐食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。Fig.13 から分かるように、公称引張強さは減肉率の増加とともに徐々に低下している。また、実腐食部材を用いた実験結果はばらついており、模擬腐食ピットを設けた試験体の実験結果は、実腐食部材を用いた実験結果の下限值に近い値をとっている。これは、板厚 5mm あるいは 6mm の試験体に設けられた直径 20mm の模擬腐食ピットは実腐食部材の板厚 10mm の場合に換算すると直径 40mm あるいは 33mm のピットとなり、実腐食部材に発生していた腐食ピット (平均直径 25~30mm) の場合よりも相対的にピットが大きいためと考えられる。

破断伸びと平均減肉率の関係を Fig.14 に示す。この図には、既報^[23]における実腐食部材 (船齢 14 年、元厚 10mm、腐食ピット平均直径 25~30mm) の実験結果をあわせてプロットしてある。この図から分かるように、ピットによる減肉がある場合、破断伸びは著しく低下している。また、実腐食部材を用いた実験結果には若干のばらつき

Photo 3 Tensile Test Specimens after Test ($t_0=6\text{mm}$)

が見られる。それに対して、模擬腐食ピットを設けた試験体の実験結果は、実腐食部材を用いた実験結果の下限値に近い値をとっている。これは、上述の通り、板厚 5mm あるいは 6mm の試験体に設けられた直径 20mm の模擬腐食ピットが実腐食部材（板厚 10mm）に発生していた腐食ピットよりも相対的に大きいためと考えられる。実験後の試験体の例を Photo 3 に示す。この写真からも模擬腐食ピットを設けた試験体では変形量が小さいことが分かる。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し、破断に至ることから試験体全体の変形量が小さくなるためと考えられる^{[23],[24]}。

腐食ピットが発生している部材強度には、部材板厚、腐食ピットの形状、大きさ、個数などのパラメータが影響を及ぼすと考えられるが、上記の引張試験結果から考えると、前述の小型構造物モデルの模擬腐食ピットを設けたウェブの状態（元厚 5mm あるいは 6mm、模擬腐食ピット直径 20mm）は、実部材^[23]（船齢 14 年、元厚 10mm、腐食ピット平均直径 25~30mm）よりも厳しい条件であるといえる。

前述の通り、小型構造物モデルを用いた試験において、ウェブに模擬腐食ピットを設けていない場合、ウェブ破断が生じないが、ウェブに模擬腐食ピットを設けた場合、ウェブ破断が生じる。これは、上述の引張試験結果から分かるように、ピットの存在によりウェブの破断伸び（引張荷重下の変形能力）が小さくなり、斜張力場に働く引張荷重に抵抗しきれず、破断が生じるためと考えられる。前述の通り、ピット面積率が大きくなるほど破断に至るまでの変形量が小さくなる。Fig.4 から分かるように、ピット面積率が 50%を超える G3-5（H3-5）では、ピットを設けていない G3-1（H3-1）の座屈開始荷重時の

変形量にも達しないうちに破断に至っている。腐食衰耗した部材の切替え基準を考える際に、部材の変形能力を考慮するのは非常に困難であるが、ピットの大きさに応じて、ピット面積率をある範囲におさえることなどによって、部材の変形能力を確保することは可能ではないかと考えられる。

7. 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腐食、特に腐食ピットの影響を明らかにすることを目的とした。

第 6 報である本報では、ウェブのせん断強度に及ぼす腐食ピットの影響について検討するため、既報^{[27]-[29]}と同様な断面形状を持つ構造物モデルを用いて、3 点曲げ試験を実施するとともに、FEM を用いた弾塑性大たわみ解析を実施した。さらに、一様衰耗の場合との比較検討を実施した。以下に得られた主な結果を示す。

- (1) 荷重増加とともに荷重と変位の関係は直線関係から外れ、せん断座屈が発生すると勾配が小さくなるものの荷重は増加し続ける。その後、ウェブにピットが設けてある試験体では、ウェブ破断が生じる。またウェブにピットを設けていない試験体では、荷重はほぼ一定値となり変形し続け、本実験の載荷範囲内ではウェブ破断は生じなかった。
- (2) ピット面積率が大きくなるにつれて、最終強度、せん断座屈荷重ともに徐々に低下する。
- (3) ピット面積率が大きくなると破断に至るまでの変形量が急激に小さくなる。
- (4) ウェブにピットが均等に存在する場合の座屈荷重は、その平均衰耗量に対応する一様衰耗の場合の座屈荷重とほぼ等しい。
- (5) ウェブにピットが設けてある場合に破断が生じる原因は、ピットが存在する場合、破断伸びが小さくなるためと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 例えば、在田正義：船舶・海洋構造物の鋼板の衰耗について—ナホトカ号事故に関連して—，材料と環境，No.46(1997)，pp.532-540
- 2) Yamamoto, N. and Ikegami, K. : A Study on the Degradation of Coating and Corrosion of Ship's Hull Based on the Probabilistic Approach, Transactions of the ASME, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 120(1998), pp. 121-128
- 3) Yamamoto, N. and Yao, T. : Hull Girder Strength of a Tanker under Longitudinal Bending considering Strength Diminution due to Corrosion, Structural Safety and Reliability : Proceedings of the 8th International Conference, ICOSSAR 2001(2001).
- 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(1990), pp.229-236
- 5) António F. Mateus and Joel A. Witz : On the Post-Buckling of Corroded Steel Plates Used in Marine Structures, Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Vol.140(1997), pp.165-183
 - 6) P. A. Slater, M. D. Pandey and A. N. Sherbourne : Finite element analysis of buckling of corroded ship plates, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.27(2000), pp.463-474
 - 7) A. Mansour, K. Masaoka, S. Mushtaq and K. Mayoss : Impact of Imperfections on Strength and Reliability of Structures, Proceedings of International Symposium on Ocean Space Utilization Technology(2003), pp.189-196
 - 8) 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, Vol.217(2003), No.M4, pp.185-200
 - 9) 奥村誠, 藤井堅, 塚井誠人 : 空間的自己相関を考慮した鋼板腐食形状のモデル化, 土木学会論文集, No.672/VI-50(2001), pp.109-116
 - 10) 藤井堅, 海田辰将, 平井勝志, 奥村誠 : 腐食鋼板表面形状モデル作成における空間的自己相関モデルの適用性, 構造工学論文集, Vol.48A(2002), pp.1031-1038
 - 11) 藤井堅, 海田辰将, 中村秀治, 有尾一郎 : 経年変化を考慮した腐食表面生成モデル, 構造工学論文集, Vol.50A(2004), pp.657-665
 - 12) 中村秀治, 藤井堅, 石川智己, 海田辰将 : 経年水力鋼構造物の腐食面形状の統計的性質について, 構造工学論文集, Vol.49A(2003), pp.687-696
 - 13) 松本勝, 白井義朗, 中村幾雄, 白石成人 : 腐食鋼材の有効板厚評価法の一提案, 橋梁と基礎, Vol.23, No.12(1989), pp.19-25
 - 14) 北本真, 神藤謙一, 氏家禎男 : 鋼材の腐食・孔食が強度特性に与える影響に関する研究, 電力土木, No.273(1998), pp.14-19
 - 15) 村中昭典, 皆田理, 藤井堅 : 腐食鋼板の表面性状と残存耐力, 構造工学論文集, Vol.44A(1998), pp.1063-1071
 - 16) Michel Bruneau and Seyed Mehdi Zahrai : Effect of Severe Corrosion on Cyclic Ductility of Steel, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.123, No.11(1997), pp.1478-1486
 - 17) Z. Sádovský and M. Drdáký : Buckling of plate strip subjected to localised corrosion - a stochastic model, Thin-Walled Structures, 39(2001), pp.247-259
 - 18) Kayer, J. R. and Nowak, A. S. : Capacity loss due to corrosion in steel-girder bridge, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.115, No.6(1989), pp.1525-1537
 - 19) Vo Thanh Hung, 永澤洋, 佐々木栄一, 市川篤司, 名取暢 : 腐食が原因で取り替えられた実鋼橋支点部の載荷実験および解析, 土木学会論文集, No.710/I-60(2002), pp.141-151
 - 20) 海田辰将, 藤井堅, 原考志, 中村秀治, 上野谷実 : 腐食鋼板のせん断耐力とその評価法, 構造工学論文集, Vol.50A(2004), pp.121-130
 - 21) ボータンフン, 佐々木栄一, 市川篤司, 三木千壽 : 腐食を模擬した模型桁のせん断耐力に関する実験及び解析, 構造工学論文集, Vol.48A(2002), pp.1099-1105
 - 22) 森猛, 渡邊一, 正井資之 : 腐食した鋼板の表面形状シミュレーションと腐食鋼桁の曲げ耐力, 構造工学論文集, Vol.49A(2003), pp.675-686
 - 23) 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
 - 24) 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
 - 25) IACS, Unified Requirements S-31, Rev.2, 2004
 - 26) 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
 - 27) 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
 - 28) 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
 - 29) 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
 - 30) Basler, K. : Strength of plate girders in shear, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.87(1961), No.ST7, pp.151-180
 - 31) 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
 - 32) 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
 - 33) 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
 - 34) 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.
 - 35) F. Shahabian and T. M. Roberts : Combined Shear-and-Patch Loading of Plate Girders, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.126, No.3(2000), pp.316-32
 - 36) 鈴木敏郎, 五十嵐規矩夫, 常木康弘 : H 形鋼梁ウェブ要素の弾塑性せん断座屈挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 556 号(2002), pp.151-158