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—

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 (4th 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. In the present study, 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. In these tests, two equal concentrated loads has been applied at the one third points of simply supported models so that compression load would act on the face plate. In this testing condition, lateral-distortional buckling occurred before ultimate load was reached and local buckling of the face plate was observed after the ultimate load. It has been revealed that the effect of pitting on the web plate on lateral-distortional buckling load was small but ultimate load decreases with the increase of area ratio of pitting. As a result of FE-Analysis, the ultimate 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

バルクキャリア貨物倉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^[1]。これらの損傷の主たる原因は過度の腐食と考えられる。腐食の実態調査を行った結果、専ら石炭と鉄鉱石を積載するバルクキャリア貨物倉倉内肋骨においては、凹凸の激しい腐食ピットが発生することがあることが明らかとなった^{[2],[3],[4]}。これまでの調査から、このような凹凸の激しい腐食形態は、この種のバルクキャリアの塗装された倉

内肋骨に見られる腐食形態のひとつであると考えられる。平均的に腐食が進行している場合と比較して、広範囲にわたり多数の凹凸が激しい腐食ピットが存在する場合、残存強度の評価が難しいと考えられることから、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、特に広範囲にわたり存在する多数の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)実部材と人工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平板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の検討を実施してきた^{[2],[3]}。

上述のように、単純な荷重条件（引張、圧縮）における平板の強度に及ぼす腐食ピットの影響について明ら

* (財)日本海事協会 技術研究所

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

かにしてきたが、構造強度との関連が明確ではないことから、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さらに検討を進めていく必要があると考えられる。ここに、曲げを受ける部材の強度を検討する場合、一般に、(1)引張側フランジの強度（フェイスが引張側となる場合の強度）、(2)横倒れ座屈強度、(3)ウェブの剪断強度、(4)各板要素の局部座屈強度、及び(5)集中荷重に対するウェブの圧壊（web crippling）などが重要な項目である。曲げ部材強度に及ぼす腐食ピットの影響を考える場合も、上記の(1)～(5)のそれぞれについて検討が必要であると考えられる。そこで、前報¹⁾では、主に上記の(1)と(5)に及ぼす腐食ピットの影響を調べるために、断面寸法がケープ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影響を強く受けることを示した。

本報では、引き続き、上記の(2)横倒れ座屈強度に及ぼす、広範囲にわたり存在する多数の腐食ピットの影響について調査する。曲げ部材の横倒れ座屈強度については

古くから研究がなされている¹⁰⁾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。そこで、倉内肋骨のフェイスが圧縮側となるような部位を想定し、前報と同様な断面寸法を持ち、ウェブにはドリル加工により模擬腐食ピットを設けた構造物モデルを用いて横倒れ座屈試験を実施した。本報の最大の目的は、横倒れ座屈挙動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、一樣衰耗の場合との違いについて検討することにある。実験に引き続きFEM解析を実施し、横倒れ座屈挙動に及ぼす腐食ピットの影響について詳しく考察した。

上記の(3)ウェブの剪断強度、及び(4)各板要素の局部座屈強度に及ぼす腐食ピットの影響については現在検討中であり、次報以降で報告予定である。

2. 構造物モデルを用いた横倒れ座屈試験

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346～404MPa、引張強さは535～578MPaであり、破断伸びは30～32%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。試験体の断面寸法は、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及びフレームスペース940mmのケープ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3,400mm、スパンは3,000mmであり、載荷点となるスパンを3等分する箇所にはリブが設けられている。計6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横倒れ座屈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船舶14年のバルクキャリアにおける腐食が原因で切り替えられた倉内肋骨に発生していた腐食ピットの形状を調査した結果^{12),13),14)}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1/2のモデルであるので、これは、実部

Table 2 Artificial Pitting in Each Specimen

No.	Pit Dia.	Number of Pits		Area Ratio of Pit	Local Average Thickness Loss	
		A	B		mm	%
D4-1	No Pit	0	0	0.0	0.0	0.0
D4-2	20mm	107	107	0.45	0.75	12.5
D4-3	20mm	107	107	0.45	0.75	12.5
D4-4	20mm	107	107	0.45	0.75	12.5
D4-5	20mm	108	108	0.15	0.25	4.2
D4-6	20mm	220	220	0.30	0.50	8.3

(a) D4-2 ~ D4-4

(b) D4-5

(c) D4-6

Fig. 3 Pit Distribution in Each Specimen

Photo 1 Test Set-up

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。試験体中央部の外板、フェイス及びリブで囲まれたウェブ部分全体をピット加工領域としたものが D4-5 と D4-6 である。また、そ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、D4-2、D4-3 及び D4-4 である。また、最も厳しい状態を想定し、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、D4-1 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した。

(a) D4-1

(b) D4-6

Fig. 4 Load-Vertical Deflection Curves

2.4 試験方法

実験装置は 1,000kN 万能試験機を用い、試験体はフェイス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 点にフェイス側から集中荷重を負荷した。従って、中央スパン 1,000mm は等モーメント分布となる。中央断面においては、外板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 点とフェイスの 1 点で横たわみを計測した。また、横倒れ座屈開始荷重とフェイスの局部座屈開始荷重及び外板の変形状況を調査するために、中央断面のフェイスの表裏合わせて 4 箇所と外板の 2 箇所にひずみゲージを貼付した。試験体設置状況を写真 1 に示す。

3. 横倒れ座屈試験結果

3.1 荷重-変位関係

まず、ピットを設けていない試験体 D4-1 及びピットの個数が最も多く最終強度が最も小さかった試験体 D4-6 の結果を用いて、荷重-変位関係について説明する。図 4(a)及び(b)に D4-1 及び D4-6 における荷重と試験体中央下部の鉛直方向変位の関係をそれぞれ示す。こ

の図には、後述する方法で求めた横倒れ座屈開始荷重及びフェイスの局部座屈開始荷重を示してある。なお、D4-1 では、フェイスの局部座屈開始荷重を求めるため

Fig. 5 Lateral Deflection

Fig. 6 Load-Strain Curves

のひずみゲージを貼付していないため、局部座屈開始荷重の実験値は不明である。また、この図には、後述する FEM 解析の結果についても合わせて示している。この図から分かるように、最終強度前に横倒れ座屈が開始し、最終強度に至った後、徐々に荷重が低下し、フェイスで局部座屈が生じてさらに荷重低下が進行していく。

図 5(a)及び(b)に D4-1 及び D4-6 の最終強度時と鉛直方向変位最大時における試験体中央部の横変位をそれぞれ示す。この横変位は、外板に直接取り付けられた変位計によりウェブ及びフェイスの変位を測定したものであり、外板に対する相対変位である。なお、後述の通り外板の面外曲げ変形は小さく、横変位はウェブ及びフェイスのそれと比較して小さいと考えられる。この図には、後述する FEM 解析の結果についても合わせて示している。この図から分かるように、ウェブ及びフェイスは外板に対して倒れるように大きく変形していることが分かる。

3.2 荷重—ひずみ関係

図 6(a)及び(b)に D4-1 及び D4-6 における荷重と試験体中央断面におけるひずみの関係をそれぞれ示す。図 6(b)には、後述する FEM 解析の結果についても合わせて示している。図 6(a)及び(b)の ϵ_1 (ϵ_3) と ϵ_2 (ϵ_4) を見ると、負荷開始直後は、試験体全体の面内曲げにより圧縮ひずみが生じるが、途中から ϵ_2 (ϵ_4) の進行方向は反転し、引張ひずみを生じていることが分かる。これは、ウェブ及びフェイスの横倒れ変形により横倒れる方向にあるフェイス半幅は引張荷重を受けることになることによるものと考えられる。また、それとは反対側にあるフェイス半幅は圧縮荷重を受けるが、図 6(b)を見ると分かるように、変形が進行するとフェイス表裏のひずみ (ϵ_1 及び ϵ_3) の片方の進行方向が反転する。これは、圧縮側のフェイス半幅で局部座屈が生じるためと考えられる。本論文では、 ϵ_2 及び ϵ_4 の進行方向が反転する荷重を横倒れ座屈開始荷重、 ϵ_1 あるいは ϵ_3 の進行方向が反転する荷重を局部座屈開始荷重と定義する^{[7],[8]}。

図 6(a)の ϵ_5 と ϵ_6 の挙動から分かるように、外板は試験体全体の面内曲げによる引張荷重を受けているため、引張ひずみを生じているがその絶対値はフェイスに生じているひずみより小さい。また、 ϵ_5 と ϵ_6 の挙動に差がないことからフェイスと異なり、外板の面外曲げ変形は小さいものと考えられる。

3.3 崩壊モード

実験後の試験体の例 (D4-1) を図 7~10 の各図の(a)に示す。各図の(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。図 7(a)から分かるように、試験体はフェイス側が圧縮、外板側が引張となるような曲げ

荷重を受け、全体的に大きく変形している。図 8(a)は、試験体中央部をフェイス側から撮影したものであり、フェイスが面外に大きく変形していることが分かる。また、図 9(a)には、試験体中央部のフェイスに発生した局部座屈の様子を示す。図 10(a)は、試験体の中央断面写真であり、横倒れ座屈を生じて、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。

3.4 最終強度、変形挙動に及ぼすピットの影響

表 3 に実験及び後述する FEM 解析の結果得られた各試験体における最終強度、横倒れ座屈開始荷重、フェイスの局部座屈開始荷重及びフェイスの局部座屈開始時における試験体中央下部の鉛直方向変位をまとめた。図 11 に各試験体の最終強度及び横倒れ座屈開始荷重の実験値を示す。この図から分かるように、ピットがウェブの上段（フェイス寄り）に集中して存在する場合（D4-2）、中段に集中して存在する場合（D4-3）及び下段に集中して存在する場合（D4-4）の中で、最も最終強度が低いのは D4-3 であり、ピットが存在しない場合(D4-1)に対する最終強度の低下は約 3%である。また、ピットがウェブに比較的均等に分布する D4-5(ピット面積率：

Fig. 7 General View of Specimen After Test (D4-1)

Fig. 8 Lateral Deformation of Face Plate (D4-1)

Fig. 9 Local Buckling of Face Plate (D4-1)

Fig. 10 Cross-section of Specimen After Test (D4-1)

Table 3 Results of Test and FE-Analysis

T.P.No.	Ultimate Load (kN)		P_{lth}^* (kN)		P_{fb}^{**} (kN)		Vertical Deflection at P_{fb} (mm)	
	Exp.	FEM	Exp.	FEM	Exp.	FEM	Exp.	FEM
D4-1	292.5	274.8	220.0	226.4	***	229.8	***	46.1
D4-2	293.5	263.6	272.3	223.3	281.4	215.3	63.4	52.7
D4-3	284.0	266.8	217.9	225.8	***	210.0	***	58.9
D4-4	289.2	271.9	250.4	226.3	257.6	232.2	54.0	41.1
D4-5	283.4	265.8	239.8	225.2	259.0	228.2	56.4	43.1
D4-6	272.1	258.5	231.1	223.6	235.9	208.6	69.4	54.7

Note
 P_{lth}^* : Load at start of lateral-distortional buckling
 P_{fb}^{**} : Load at start of face local buckling (Face local buckling occurs after ultimate load for all the specimens.)
 P_{lth}^{***} : P_{lth} for this specimen is not measured.

Fig. 11 Ultimate Load and Lateral-Distortional Buckling Load (Experiment)

0.15) 及び D4-6 (ピット面積率: 0.30) の D4-1 (ピットなし) に対する最終強度の低下は、それぞれ、約 3% 及び約 7% である。ピット面積率が大きくなるにつれて、最終強度が低くなる傾向にあることが分かる。

図 11 から分かるように、横倒れ座屈開始荷重については、ばらつきが大きくピットの影響が明らかではない。また、表 3 に示したように局部座屈荷重については、実験では求まっていない試験体もある。そこで、横倒れ座屈開始荷重及び局部座屈開始荷重に及ぼすピットの影響については後述する FEM 解析結果をもとに検討することにする。

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 は表 1 の通りであり、加工硬化率 H' は表 4 に示す通りである。形状モデリングにあたっては、対称性を考慮して、試験体の 2 分の 1 をモデリングした。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、試験体中央部 1,000mm のウェブは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図 12 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。本モデリング方法により、ピットが存在するウェブの座屈挙動を精度良く予測可能であることが分かっている¹⁰⁾。

Table 4 Work Hardening Modulus Used in Analysis

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

Fig. 12 Geometrical Model

Fig. 13 Assumed Initial Imperfection

4.2 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。本研究では、実験前に試験体の初期たわみ測定は実施していない。そこで、初期たわみは、I 形ばりの初期たわみの実測例を見ると $\sin$ の半波長に近似できる場合が多いこと¹⁰⁾や実験で観察された座屈形状を参考にして、試験体の中央スパン 1,000mm ($=a$) のウェブおよびフェイスに図 13 及び下式に示すような初期不整を与えた。

$$\theta = \theta_0 \sin \frac{\pi x}{a} \quad (1)$$

$$w_0 = h \sin \theta_0 = \frac{a}{1,000} \quad (2)$$

ここで、 θ は外板に対するウェブの初期倒れ角 (θ_0 はその最大値)、 w はウェブとフェイスの接合部の初期横変形 (w_0 はその最大値) であり、 h はウェブ深さである。

本解析に先立って、粗いメッシュを用いてピットを設けていない試験体 D4-1 について予備解析を実施した。予備解析の結果得られた D4-1 の変形モードを図 7~10 の各図の(b)に示した。実際の試験体の変形モード (図 7~10 の各図の(a)) との比較から分かるように、試験体全体の変形モード (図 7)、フェイスの横変形挙動 (図 8)、フェイスの局部座屈挙動 (図 9) 及び試験体中央断面の横倒れ変形状況 (図 10) を良く再現できていることがわかる。また、上式の通り、ウェブとフェイスの接合

Fig. 14 Ultimate Load and Start of Lateral-Distortional Buckling (FE-Analysis)

Fig. 15 Start of Face Local Buckling (P_{fb}) and Vertical Deflection at P_{fb} (V_{fb})

(a) Experiment

(b) FE-Analysis

Fig. 16 Local Buckling of Face Plate (D4-3)

部にのける初期不整 w の最大値 w_0 を中央スパン長 1,000mm の 1/1,000 としている。この場合 (D4-1) の最終強度の予測値の実験値に対する比は 0.94 であり予測精度は良好である。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。横倒れ座屈挙動に及ぼす残留応力の影響については今後検討していく予定である。

4.3 解析結果

4.3.1 荷重—変位関係の予測結果

図 4(a)及び(b)にビットを設けていない試験体 D4-1 と設けたビットの個数が最も多く、D4-1 と比較して最終強度の低下が最も大きい D4-6 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。この図から分かるように、最終強度後の耐力の劣化勾配を大きく予測する傾向があるが、最終強度の予測値の実験値に対する比は、D4-1 の場合で 0.94、D4-6 の場合で 0.95 であり、最終強度の予測精度は良好である。

また、図 5(a)及び(b)に D4-1 及び D4-2 の最終強度時と最大変位時における試験体中央断面における横倒れ変形の予測結果をそれぞれ示した。この図から分かるように、試験体の横倒れ変形を精度良く予測可能であることが分かる。

4.3.2 荷重—ひずみ関係の予測結果

図 6(b)に D4-6 の荷重と試験体中央断面におけるひずみの関係を予測した結果を示した。この図には、試験体に貼付したひずみゲージの位置に最も近い位置にある積分点のひずみを示してある。この図から分かるように、荷重とひずみの関係の予測精度は良いことが分かる。

4.4 最終強度、変形挙動に及ぼすビットの影響

第 3 章で述べた通り、横倒れ座屈開始荷重の実験値はばらつきが大きいことと、実験ではフェイスの局部座屈開始荷重が求まっていない試験体があることから、ここでは、最終強度を含めて、横倒れ座屈開始荷重及びフェイスの局部座屈開始荷重における変形量に及ぼすビットの影響について FEM 解析結果をもとにまとめておく。表 3 に FEM 解析から求めた各試験体における最終強度、横倒れ座屈開始荷重、フェイスの局部座屈開始荷重及びフェイス局部座屈開始時における試験体中央下部の鉛直方向変位をまとめた。

図 14 に FEM 解析から求めた各試験体における最終強度及び横倒れ座屈開始荷重を示す。ビットがウェブの上段 (フェイス寄り) に集中して存在する場合 (D4-2)、中段に集中して存在する場合 (D4-3) 及び下段に集中して存在する場合 (D4-4) の中で、最も最終強度が低いのは D4-2 (実験では D4-3) であり、ビットが存在しない場合 (D4-1) に対する最終強度の低下は約 4% である。以上のように、ビットが局所的に集中する D4-2~D4-4 の場合、実験結果と解析結果における最終強度の低下傾向が必ずしも一致していないが、いずれの場合もビットを設けていない D4-1 に対する最終強度の低下は約 4% 以内におさまっており、最終強度の低下は小さいといえる。また、ビットがウェブに比較的均等に分布する D4-5 (ビット面積率: 0.15) 及び D4-6 (ビット面積率: 0.30) の

Fig. 17 Relationship between Ultimate Load and Average Thickness Loss (FE-Analysis)

Fig. 18 Load-Vertical Deflection Curve (Comparison between Uniform Corrosion and Pitting Corrosion)

D4-1 (ピットなし) に対する最終強度の低下は、それぞれ、約 3% (実験でも約 3%) 及び約 6% (実験では約 7%) である。ピット面積率が大きくなるにつれて、最終強度が低くなる傾向にあることが分かる。一方、横倒れ座屈開始荷重はピット面積率によらずほぼ一定であることが分かる。

図 15 に各試験体におけるフェイスの局部座屈開始荷重及びその時の試験体中央下部の鉛直方向変位を示す。この図から分かるように、フェイスの局部座屈開始荷重は、各試験体間で大きな差は見られないが、その時の試験体中央下部の鉛直方向変位は D4-1、D4-4 及び D4-5 において、他の試験体 (D4-2、D4-3 及び D4-6) よりも低くなっている。実験及び FEM 解析のいずれの場合においても D4-1、D4-4 及び D4-5 では、フェイスの座屈モードが 1 半波であるのに対して、その他の試験体 (D4-2、D4-3 及び D4-6) では、3 半波となっている。座屈モードが 1 半波となる場合の例 (D4-1) は図 9 に示した通りであるが、座屈モードが 3 半波となる場合の例として D4-3 のフェイスの局部座屈の状況を図 16(a) 及

び(b)に示す。ウェブの板厚やピット分布の影響を受け、フェイスの座屈モードが変化し、それにより局部座屈開始時の変形量も変化するものと考えられる。

5. 考 察

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は低下する傾向にある。前述の通り、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と考えられる。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及び変形挙動について比較する。試験体の中央スパン 1,000mm のウェブが一様衰耗している場合と試験体 D4-5 及び D4-6 の FEM 解析結果を最終強度とウェブ衰耗率の関係で図 17 に示す。この図から分かるように、ピットがある程度均等に分布する D4-5 と D4-6 の最終強度はそれぞれの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。また、D4-6 の場合について、ピット分布を考慮した場合とその平均衰耗率に対応する一様衰耗の場合の荷重と試験体中央下部の鉛直方向変位の関係を図 18 に示す。図から分かるように、最終強度に到達し荷重低下が生じ始めて、ピット分布を考慮したモデルでフェイスの局部座屈が開始するまでは、両者の荷重-変位関係はほぼ一致する。ピット分布を考慮したモデルではフェイスに 3 半波の局部座屈が生じ、一様衰耗のモデルでは 1 半波の局部座屈が生じるため、両者の局部座屈発生時期及び荷重低下挙動は異なる。

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ている。第 1 報²⁾及び第 2 報³⁾では、腐食の実態調査を実施するとともに、腐食ピットが発生した実部材及びドリル加工により模擬腐食ピットを設けた部材を用いた引張試験及び圧縮座屈試験を実施し、単純な荷重条件における平板の強度に及ぼす腐食ピットの影響を明らかにした。

現在、倉内肋骨の構造強度、すなわち、曲げ部材としての強度に及ぼす腐食ピットの影響を進めている。前報⁴⁾では、「フェイスが引張側となる場合の強度」及び「集中荷重に対するウェブの圧壊強度」について検討し、ウェブ上のフェイス寄り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影響を強く受けることなどを示した。

本報では、引き続き、「横倒れ座屈強度」に及ぼす腐食ピットの影響について調査するために、断面形状がケープ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、フェイスが圧縮側となるような4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) 最終強度に達する前に横倒れ座屈が開始し、最終強度に至った後、徐々に荷重が低下し、フェイスで局部座屈を生じてさらに荷重低下が進行していく。
- (2) ウェブにピットが均等に分布している場合、ピット面積率が大きくなるに従い、最終強度が低下する。
- (3) 横倒れ座屈開始荷重に及ぼすウェブに存在するピットの影響は小さい。
- (4) 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。なお、最終強度後の両者の耐力には差が見られる。

現在、引き続き、「ウェブの剪断強度」及び「各板要素の局部座屈強度」に及ぼす腐食ピットの影響について検討中であり、次報以降で報告予定である。

参考文献

- 1) 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, 日本造船学会論文集, 第195号(2004), pp.291-297
- 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, 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
- 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
- 6) 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
- 7) 久保全弘, 北堀裕隆, 杉山宣央, 八木孝行: ノンコンパクトな一軸対称I形はりの横ねじれ座屈, 土木学会論文集, No.591/I-43(1998), pp.175-188
- 8) Kubo, M. and Fukumoto, Y.: Lateral-torsional buckling of thin-walled I-beams, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No.4(1988), pp.841-855
- 9) 西田進, 福本嘯士: はりの横倒れ座屈挙動に関する一簡易算定法, 土木学会論文報告集, 第328号(1982), pp.11~18