

腐食したフランジの簡易な圧縮強度評価法

海田 辰将¹・藤井 堅²・中村秀治³

¹正会員 工博 高知工業高等専門学校 建設システム工学科 (〒783-8508 高知県南国市物部 200 番 1)

E-mail:kaita@ce.kochi-ct.ac.jp

²正会員 工博 広島大学大学院助教授 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1 丁目 4 -1)

E-mail:ken214f@hiroshima-u.ac.jp

³フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1 丁目 4 -1)

E-mail:naka0906@hiroshima-u.ac.jp

本研究では、腐食した圧縮フランジの簡易強度評価法を示す。強度解析での腐食表面は、空間的自己相関モデルを適用し、平均板厚 t_{avg} 、板厚の標準偏差 σ_t および平均偏心量 e_{avg} の統計量を変化させて作成する。まず、実際の腐食鋼板の座屈試験結果との比較から、本解析手法が実際の腐食フランジの強度評価に適用できることを示す。次に、種々の凹凸状況を有する腐食表面を用いてパラメトリックに強度解析を行い、腐食したフランジの圧縮強度の簡易評価法を提案する。ここでは、腐食フランジの圧縮強度は、代表板厚 $t_r = t_{avg} + 2\sigma_t$ を用いて幅厚比パラメータを求めれば、腐食の無いフランジの座屈強度曲線から評価できること、また、偏心の影響は平均偏心量と平均板厚の比 e_{avg}/t_{avg} を用いて評価できることを示す。

Key Words : maintenance, corrosion, strength estimation, flange plate, compressive strength

1. はじめに

近年、鋼橋の腐食損傷事例が多数報告されるようになった。鋼部材が腐食減肉すると強度や剛性が低下し、構造物の保有性能が低下する。腐食した構造物が健全かどうかの判断には、その保有性能が要求性能を上回っているかどうかを評価し推定する必要がある。しかしながら、腐食した構造物あるいは部材の保有性能を精度良く評価することは難しい。したがって、我が国の高度成長期に架設された莫大な数の橋梁が40年以上経過し、腐食損傷が顕在化している現状^{1),2)}を鑑みると、腐食した鋼橋が保有する強度を正確に評価する技術の確立は、急務の課題といえる。

昨今、実際に腐食した鋼材や促進試験によって腐食させた鋼材を用いて、実験的に強度評価法を確立しようとする試みが精力的に行われはじめている³⁾⁻⁹⁾。一方、腐食鋼材の強度評価法を確立させるためには、実験だけでは数的に不十分であり、さらに、実験では表面形状測定などに多大な労力を要することから、人工的に発生させた腐食表面を用いて解析的に強度評価を行う試みも行われている¹⁰⁾⁻¹⁵⁾。しかし、この種の研究に関する基礎資料は未だ十分ではなく、また、確立された残存強度評価法も無いのが現状である。

腐食した鋼部材の残存強度評価法は、腐食状況の特徴をふまえ、精度良く容易に強度評価できるのが望ましい。さらに、腐食表面の計測結果から得られるいくつかの統計量が、その強度評価に適用できれば便利であろう。

そこで本研究では、空間的自己相関モデル¹⁰⁾により人工的に作成した腐食表面を用いて、圧縮を受ける3辺単純支持1辺自由の腐食鋼板(このような鋼板はプレートガーダー圧縮フランジの座屈解析で多用されているので、以下ではこれをフランジと呼ぶことにする)の弾塑性有限要素解析を行い、その結果に基づいて、鋼板の腐食状況を表す統計量を用いた簡易な圧縮強度評価法を提案する。

以下では、2. で実際の腐食鋼板の座屈試験結果と解析結果を比較し、板要素を用いた本有限要素解析法が実際の腐食鋼板の圧縮強度評価に十分適用できることを示す。次に、3. で空間的自己相関モデルにより作成した種々の腐食表面を用いてパラメトリックに強度解析を行い、腐食したフランジの終局挙動を明らかにするとともに圧縮強度評価のための統計量について検討する。最後に、4. で代表板厚を用いた腐食フランジの簡易な圧縮強度評価法を提案する。

2. 腐食鋼板の圧縮強度解析における板要素を用いた有限要素解析の妥当性

腐食鋼材の強度に影響する因子は、鋼材の応力状態によって異なるであろう。たとえば引張や疲労を受ける場合には腐食表面の凹凸状態に起因する応力集中が強度に大きく影響するから、Solid要素を用いた有限要素解析などが要求されよう。このような理由から従来、有限要素法による腐食鋼材の強度解析には、Solid要素が主に用いられてきた⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。

しかし、圧縮を受ける座屈問題では板の曲げ剛性によって強度が決まるので、板要素を用いても、腐食鋼板の圧縮強度は推定可能と考えられる。ここでは、過去に著者らが行った座屈試験結果⁷⁾から、腐食鋼板が圧縮を受ける場合には板要素を用いても強度が推定できることを示し、圧縮強度評価に用いる統計量の適用性について検討する。

(1) 腐食鋼板の座屈試験の概要⁷⁾

座屈強度試験は、腐食鋼板から短冊状に試験片を切り出して行った。試験の概略を図-1に示す。

試験片の幅は全て30mmとし、試験片長は100～450mmに変化させて35体作成した。なお、これらの試験片の初期の板厚は、9～12mmで、部材の種類や採取位置によって初期板厚は異なっている。表面の錆や塗装を除去した後、試験片の片面に5mm間隔で格子を描き、各格子点上で板厚と偏心量を測定した。

ここで、偏心量とは、試験片に適当な基準平面を描き、その基準平面から各格子点における板の中央までの距離を示す(図-2参照)。荷重はこの基準平面内に載荷している。いま、図-2に示すように、格子点*i*において両表面がそれぞれ Z_{1i} および Z_{2i} だけ腐食したとすると、偏心量 e_i は、

$$e_i = \frac{Z_{2i} - Z_{1i}}{2} \quad (1)$$

と導かれる。

偏心が鋼板の圧縮強度におよぼす影響を考慮するために、本実験では次の平均的な偏心の大きさを表すパラメータ e_{avg} (以下では平均偏心量と呼ぶ)を用いて整理した。

$$e_{avg} = \sum_{i=1}^N \frac{e_i}{N} \quad (2)$$

ここに、 N は板厚測定的全格子点数である。また、基準平面と e_{avg} の距離にある面を平均中央面と呼び、以下では、 $e_{avg}=0$ mmの状態(基準平面と平均中央面が一致

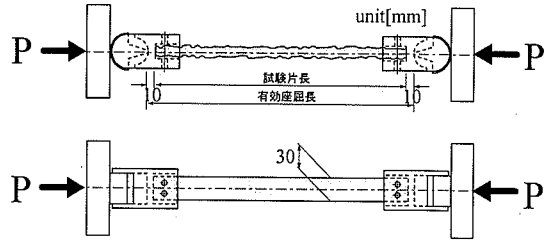


図-1 座屈試験概略

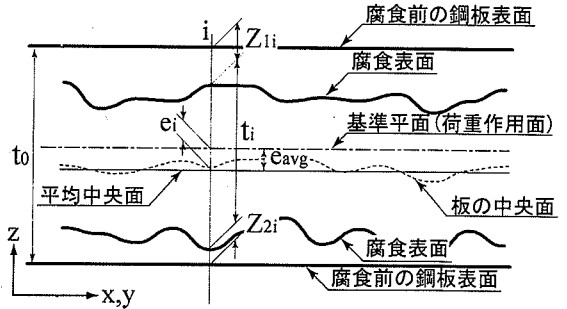


図-2 偏心量と基準平面

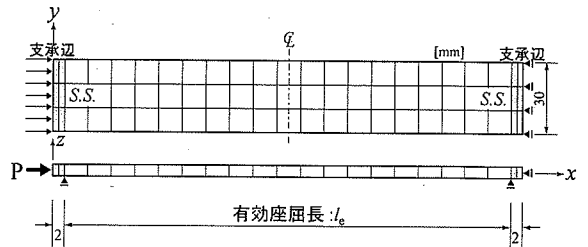


図-3 座屈試験片の解析モデル

表-1 解析ケース

| | 要素幅[mm] | 腐食表面 |
|-------|---------|------------|
| CASE1 | 10 | 実測値 |
| CASE2 | 10 | 空間的自己相関モデル |

する状態)を単に「偏心が無い」と呼ぶことにする。

試験片の腐食状況は、表面全体が腐食した全体腐食と、局部的に激しく腐食した局所腐食に大別された。全面腐食した試験片は、概ねsin半波の全体座屈モードが発生して崩壊し、局所腐食の場合は腐食の激しい箇所、くの字に折れ曲がるような局部座屈崩壊であった。なお、局部座屈崩壊は35体中15体の試験片にみられた。

(2) 板要素を用いたFEMによる圧縮強度解析

a) 解析モデルと解析条件

実測された板厚データを用いて、各試験片の弾塑性解析を行った。解析は、Up-dated LagrangianによるFEM大変形弾塑性解析である。要素は4節点アイソパラメトリックシェル要素を用いた。応力-ひずみ関係

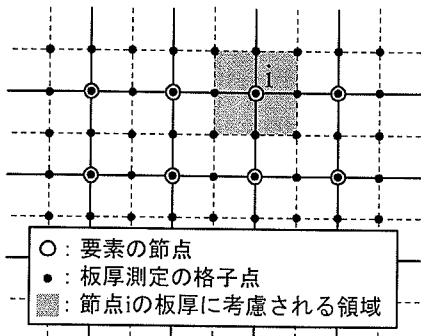


図-4 要素の節点と腐食を与える格子点

は完全弾塑性とし、Prandtl-Reussの流れ則およびMisesの降伏条件を用いた。材料特性は、両面平滑仕上げした試験片の引張試験から得られた結果(降伏応力 $\sigma_y=270$ [MPa]、弾性係数 $E=206$ [GPa]、ポアソン比 $\nu=0.28$)を用いた。

図-3に試験片の解析モデルを示す。境界条件は、支承辺で単純支持、残りの2辺は自由である。図-3で、解析モデルの支承辺の影付きの要素は、鋼板に偏心を与えるために設けた要素で、この要素の中央面をz軸方向に移動させることにより、板部分(有効座屈長区間)への偏心荷重が可能となる。なお、荷重は両端の影付き要素の中央面に荷重した。荷重は、片方の影付き部端辺に等分布強制変位を与え、節点反力から軸圧縮力を求めた。また、影付き要素の幅が大きいと、変形にともなう曲げモーメントが付加されてしまうため、なるべく要素幅を小さくしている(要素幅1mm)。

解析ケースを表-1に示す。表中、CASE1は、実測された板厚および偏心量を用いた解析で、板要素の幅は10mmである。このとき、要素の板厚と偏心量は、図-4に示すようにFEM解析での節点iの周りの影付き領域内に存在する板厚測定での格子点9点の平均板厚と平均偏心量とした。

一方、CASE2は、試験片の腐食の測定結果ではなく、空間的自己相関モデルにより人工的に作成した腐食表面を用いた解析モデルであり、作成した腐食表面に関する3つの統計量(平均板厚 t_{avg} 、板厚の標準偏差 σ_t 、平均偏心量 e_{avg})が、実測結果と同じになるように作成してある。この解析結果と実験結果を比較することにより、圧縮強度評価のための統計量の適用性を検討する。なお、CASE2の腐食表面は、格子点間隔を2mmとして片面ごとに作成した。

b) 板要素および要素分割の検討

図-5に、CASE1の解析結果と実験結果を比較して示す。解析結果と実験結果はともに最高荷重の値を示す。図から、両者の間に若干のばらつきはあるものの、解析結果は実験結果と良く対応しており、腐食鋼板の

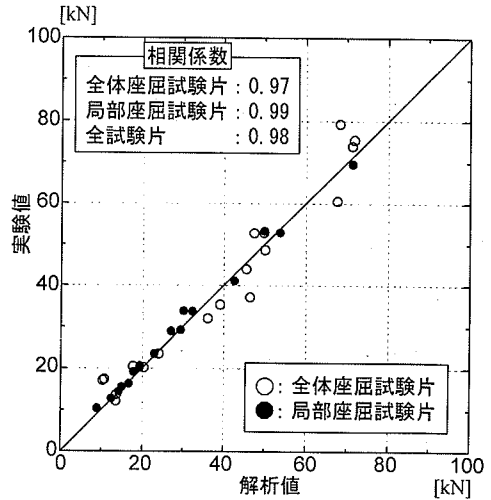
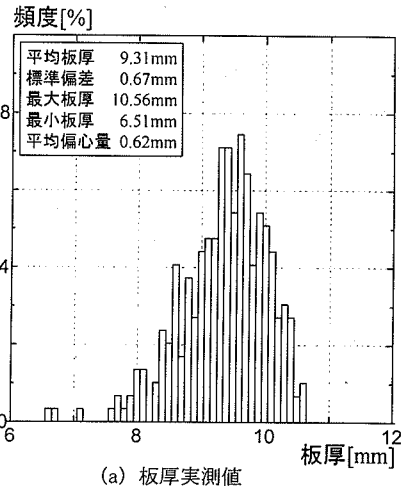
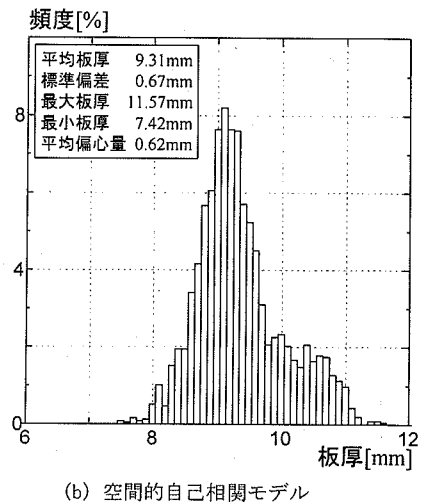


図-5 実験結果と解析結果における最高荷重の相関(CASE1)



(a) 板厚実測値



(b) 空間的自己相関モデル

図-6 板厚ヒストグラム($l_e=320$ mm, $t_0=12$ mm)



(a) 板厚実測値



(b) 空間的自己相関モデル



図-7 板厚等高線図 ($l_e=320\text{mm}$, $t_0=12\text{mm}$)

座屈強度を、板要素を用いて十分な精度で解析できることがわかる。解析値と実験値の相関係数は0.98であった。

c) 空間的自己相関モデルによる統計量の適用性

図-6に実際の試験片とCASE2の解析モデルにおける板厚ヒストグラムの一例を示す。CASE2では、平均板厚、標準偏差および平均偏心量が実際の試験片と同じになるように解析モデルを作成した。両者の板厚ヒストグラムを比較すると、同じ平均板厚と標準偏差を有していても、ヒストグラムの形状が幾らか異なっていることがわかる。

図-7に図-6の試験片の板厚等高線図を示す。図中、 t/t_0 は残存板厚 t と腐食前の板厚 t_0 の比を表している。解析モデルの表面形状は、実試験片のそれと比べて幾分異なるものの、似た形状となっている。

図-6, 7に示した試験片の圧縮強度は、実際の試験片の最高荷重(実験値)=35.37[kN], CASE2の解析モデルの最高荷重(解析値)=33.77[kN]と、ほぼ同じになった。このことから、板厚ヒストグラムや腐食表面の形状が実際と若干異なっても、平均板厚、標準偏差および平均偏心量を同じにすれば、人工的に発生させた腐食表面を用いても圧縮強度を推定できると推察される。

35体全ての試験片について解析した結果と実験結果の相関を図-8に示す。空間的自己相関モデルによって人工的に作成した腐食表面を適用した解析結果は、図に示すように実験値と良い対応を示した(相関係数0.95)。これは、腐食表面形状が実際と幾分異なっている、平均板厚、板厚の標準偏差および平均偏心量が同じならば、腐食鋼板の圧縮強度を評価できることを示している。

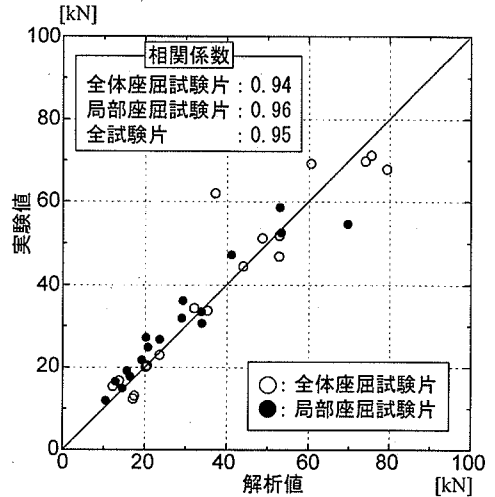


図-8 実験結果と解析結果における最高荷重の相関 (CASE2)

3. 腐食した圧縮フランジの終局挙動と圧縮強度評価のための統計量

2.において、空間的自己相関モデルにより作成した人工的な腐食表面を用いた場合と実際の腐食表面を用いた場合を比較して、腐食鋼板の平均板厚、板厚の標準偏差および平均偏心量の3つの統計量が同じならば、両者の圧縮強度はほぼ同じになることを示した。このことは、上記3つの統計量により腐食鋼板の圧縮強度を評価できる可能性を示している。

ここでは、3辺単純支持1辺自由のフランジパネルを取り上げて、空間的自己相関モデルにより発生させた種々の腐食表面を用いてパラメトリックに強度解析を実施し、これらの統計量の適用性および腐食鋼板の終局挙動についてさらに詳しく考察する。

(1) 解析概要

a) 解析モデルと解析条件

図-9に、腐食したフランジの圧縮強度評価のための解析モデルおよび要素分割を示す。解析モデルの寸法は全て200mm × 800mm (20 × 80要素)とした。

材料特性は、降伏応力 $\sigma_y=280\text{MPa}$ 、弾性係数 $E=206\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ を用いた。

なお、本解析ではフランジの残留応力および初期たわみは考慮していない。初期不整が板の圧縮強度に大きく影響することは周知のことであるが、残留応力が腐食後に初期状態からどのように変化するかは十分に解明されていない。すなわち、腐食によってフラン

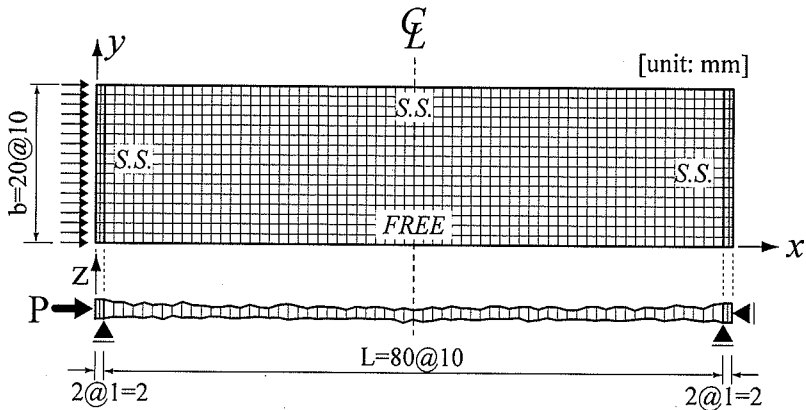


図-9 腐食したフランジの解析モデルおよび要素分割

表-2 解析モデルの詳細

| 解析モデル | t_0 [mm] | t_{avg} [mm] | σ_t [mm] | t_{max} [mm] | t_{min} [mm] | e_{avg} [mm] | σ_u/σ_y | 解析目的と解析モデルの説明 | |
|----------|------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|---------------|--|
| Series-A | 1 | 12.00 | 12.00 | 0.00 | 12.00 | 12.00 | 0.00 | 0.99 | t_{avg} の等しい腐食フランジと腐食の無いフランジの強度および終局挙動を比較する 1,2は腐食の無いフランジで板厚が異なる 3,4は腐食フランジで偏心の有無が異なる |
| | 2 | 9.00 | 9.00 | 0.00 | 9.00 | 9.00 | 0.00 | 0.73 | |
| | 3 | 12.00 | 9.00 | 1.12 | 12.00 | 4.19 | 0.00 | 0.92 | |
| | 4 | 12.00 | 9.00 | 1.12 | 12.00 | 4.19 | 0.90 | 0.82 | |
| Series-B | 1 | 11.00 | 9.00 | 1.01 | 11.00 | 4.26 | 0.00 | 0.91 | 腐食表面の凹凸の大きさ(σ_t)が強度に与える影響を調べる t_{avg} および e_{avg} が等しく、 σ_t が異なる |
| | 2 | 11.00 | 9.00 | 0.56 | 11.00 | 5.62 | 0.00 | 0.80 | |
| | 3 | 11.00 | 9.00 | 0.34 | 11.00 | 7.64 | 0.00 | 0.75 | |
| Series-C | 1 | 11.00 | 8.00 | 1.10 | 11.00 | 2.62 | 0.00 | 0.84 | 偏心が無いフランジについて、腐食表面の凹凸形状が強度に与える影響を調べる t_{avg} , σ_t , e_{avg} が等しい($e_{avg}=0$ mm) |
| | 2 | 11.00 | 8.00 | 1.09 | 11.00 | 2.97 | 0.00 | 0.85 | |
| | 3 | 11.00 | 8.00 | 1.11 | 11.00 | 3.09 | 0.00 | 0.85 | |
| Series-D | 1 | 12.00 | 10.00 | 1.10 | 12.00 | 4.89 | 0.00 | 0.95 | 腐食前の板厚(t_0)が異なるフランジの強度を比較する t_{avg} , σ_t , e_{avg} が等しく、 t_0 が異なる |
| | 2 | 13.00 | 10.00 | 1.08 | 13.00 | 4.91 | 0.00 | 0.95 | |
| | 3 | 14.00 | 10.00 | 1.12 | 14.00 | 4.01 | 0.00 | 0.95 | |
| Series-E | 1 | 12.00 | 10.00 | 0.56 | 12.00 | 6.62 | 1.00 | 0.77 | 偏心を有するフランジについて強度を比較し、 t_{avg} , σ_t , e_{avg} の適用性を検討する。 t_{avg} , σ_t , e_{avg} が等しい |
| | 2 | 12.00 | 10.00 | 0.55 | 12.00 | 7.40 | 1.00 | 0.78 | |
| | 3 | 12.00 | 10.00 | 0.56 | 12.00 | 6.62 | 1.00 | 0.77 | |

ジが減肉するとその箇所の応力は解放され、それに対応して自己釣り合いを満足するように応力再配分が起こるのである。そしてさらにそれに対応して初期たわみも変化すると考えられる。したがって、解析にこれらの初期不整を考慮することは容易であっても、実際に生じる初期不整が不明確である以上、問題の複雑化を避ける意味においても考慮しない方がよいと判断し、ここでは初期不整は考慮しないこととした。

表-2に解析モデルおよび解析結果(圧縮強度)をまとめて示す。表中、 t_0 は腐食前の板厚、 t_{max} は最大板厚、 t_{min} は最小板厚を示し、 σ_u/σ_y はフランジの平均圧縮応力における最大値

$$\sigma_u = \frac{P_u}{t_{avg} \cdot b} \quad (3)$$

を降伏応力 σ_y で除した値である。ここで、 P_u : 最高荷

重、 t_{avg} : 平均板厚、 b : 板幅である。

Series-Aは、腐食前の板厚12mmから平均板厚9mmまで腐食したフランジを想定し、偏心の無い腐食フランジSeries-A-3および偏心($e_{avg}=0.9$ mm)を有する腐食フランジSeries-A-4の2つと、腐食の無い板厚12mm(Series-A-1)および9mm(Series-A-2)のフランジを比較することにより、腐食による強度低下を調べることを目的としている。

Series-Bは、腐食前の板厚11mmのフランジが、平均板厚9mmまで腐食し、かつ偏心の無い場合を想定したものであるが、板厚の標準偏差 σ_t がそれぞれ異なっている。

Series-Cでは、平均板厚、標準偏差および平均偏心量($e_{avg}=0$ mm)の3つの統計量は等しいが、腐食表面形状がそれぞれ異なっている。本シリーズでは、偏心が無く、平均板厚と標準偏差が同じ場合に腐食表面の凹

凸形状に依存して圧縮強度が異なるか否かを調べることを目的とする。

Series-Dは、腐食前の板厚 t_0 が腐食後のフランジの圧縮強度におよぼす影響を調べるためのモデルである。すなわち、腐食後の3つの統計量は等しいが、腐食前の板厚 t_0 が異なるために腐食後の最大板厚が異なることになる。

Series-EはSeries-Cと同様、3つの統計量は同じフランジであるが、偏心を有している($e_{avg}=1mm$)点でSeries-Cと異なる。本シリーズでは、偏心を有する場合でも3つの統計量を用いて圧縮強度を表現できるかどうかを調べる。

b) 腐食表面形状の作成

図-9に示すフランジの解析モデルに、空間的自己相関モデルによって作成した腐食表面形状を片面ごとに与えた。腐食深データはフランジ上に2mm間隔で設けた格子点に与えた。板厚は、両表面の腐食深を腐食前の板厚 t_0 より差し引いて求めた。また、各格子点での偏心量 e_i は式(1)より計算した。解析を行う際の要素の幅は10mmに設定し、要素を構成する節点での板厚は、図-4で示した方法により、節点まわりの格子点での平均板厚を与えた。

(2) 腐食した圧縮フランジの終局挙動

図-10にSeries-Aのフランジの荷重-たわみ関係を示す。図の縦軸はフランジの平均圧縮応力

$$\sigma = \frac{P}{t_{avg} \cdot b} \quad (4)$$

を降伏応力 σ_y で除した値(P :軸圧縮力)を、横軸は自由辺中央の面外たわみの大きさ $|\delta_{L/2}|$ をそれぞれ表している。図-11は解析の最終状態における変形図および降伏域の状況を示す。図-11で、影付きの要素は、板厚中央の応力が降伏応力に達した要素を表している。

腐食前のフランジを想定したSeries-A-1の圧縮強度は $\sigma_y/\sigma_y=0.99$ であり、図-11(a)に示す降伏域の状況から塑性座屈による崩壊形式と判断される。また、板厚9mmで腐食の無いSeries-A-2では、 $\sigma/\sigma_y=0.65$ 付近で弾性座屈が起こり、その後、後座屈挙動が現れて耐力が上昇している(図-10参照)。

偏心の無い腐食フランジSeries-A-3とSeries-A-1およびSeries-A-2と比較すると、Series-A-3は圧縮強度 $\sigma_y/\sigma_y=0.92$ であり、腐食前のフランジSeries-A-1より圧縮強度は低下するが、同じ平均板厚9mmを有する腐食の無いSeries-A-2($\sigma_y/\sigma_y=0.73$)よりもかなり大きな圧縮強度を有している。この結果は、フランジ各節点での偏心 e_i に起因して腐食フランジの圧縮強

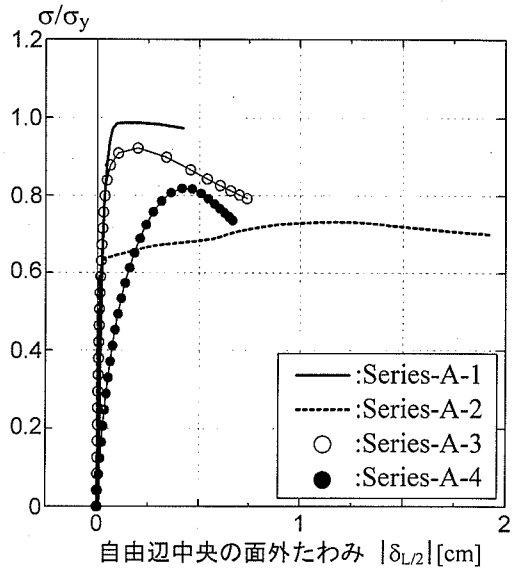


図-10 荷重-たわみ関係(Series-A)

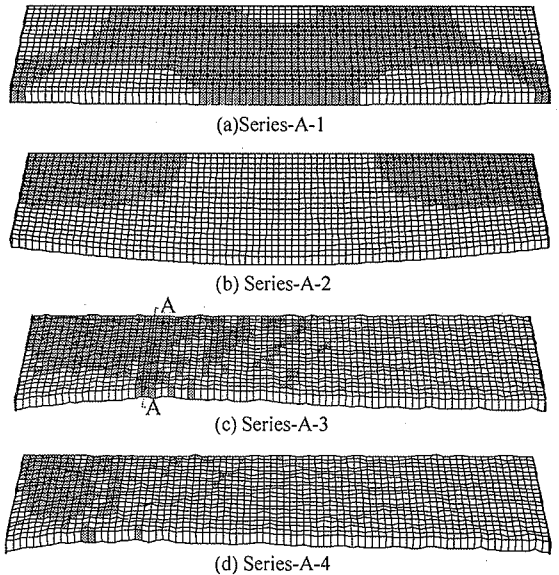


図-11 変形図と降伏域の状況(Series-A)

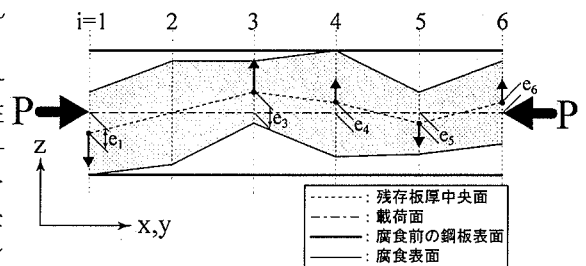


図-12 偏心 e_i の影響

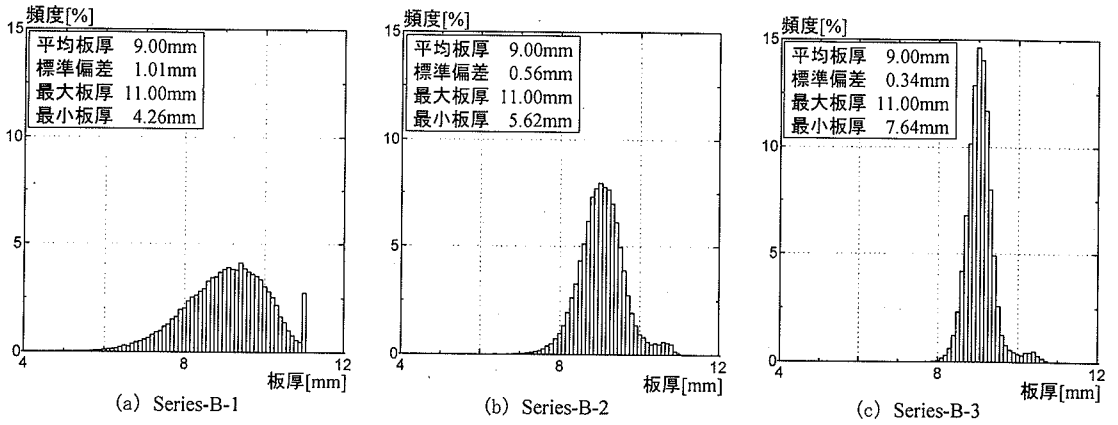


図-13 板厚ヒストグラム(Series-B)

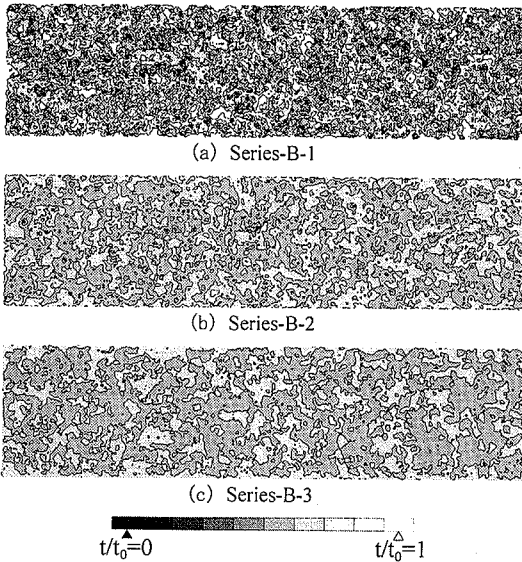


図-14 板厚等高線図(Series-B)

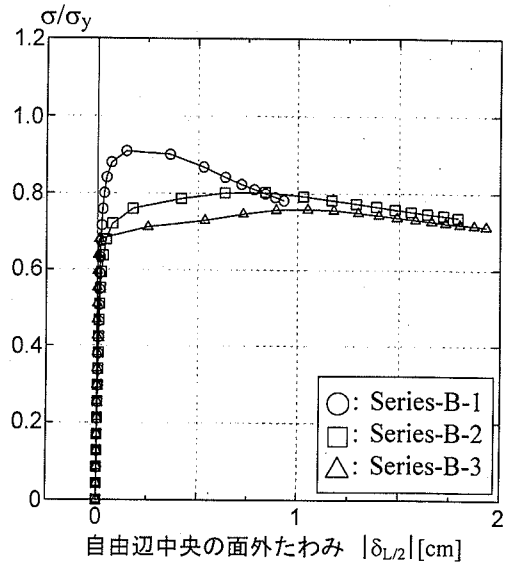


図-15 荷重-たわみ関係(Series-B)

度が上昇することを示している。すなわち、Series-A-3では、図-12に示すように腐食によって各節点に偏心 e_i が存在するため、フランジが軸圧縮力を受けるとそれぞれの節点が図中矢印で示した面外方向に変位しようとする。その結果、Series-A-2のようなsin半波形の座屈モード(図-11(b)参照)が拘束され、Series-A-2よりも大きな圧縮強度になると考えられる。このことは、図-10に示すSeries-A-3の荷重-たわみ関係で、最高荷重に達するまでほとんど面外たわみが発生していないことから裏付けられる。また、Series-A-3では後座屈挙動はみられず、Series-A-2よりも最高荷重後の耐力低下が大きくなる傾向がある。

図-11(c)に示すSeries-A-3の崩壊性状では、あるy方向断面(図のA-A断面)における全ての要素が降伏し、フランジ全体が座屈する崩壊形式となっている。これは弾性座屈によって崩壊したSeries-A-2とは明

らかに異なる崩壊性状である。

偏心を有する腐食フランジSeries-A-4では、荷重の初期段階からフランジ全体に曲げモーメントが付加される。Series-A-3とSeries-A-4を比較すると、Series-A-4における最高荷重までの荷重-たわみ曲線の傾きはSeries-A-3よりも若干小さく、圧縮強度も低下していることがわかる。また、図-11(c)および(d)の崩壊性状から、Series-A-4はSeries-A-3と類似した崩壊形式となり、腐食の無いSeries-A-2よりも大きな圧縮強度($\sigma_u/\sigma_y=0.82$)となった。

以上の解析結果から、腐食フランジの終局挙動について、腐食の無いフランジとは異なる崩壊形式になる場合があること、同じ平均板厚を持つ腐食の無いフランジよりも大きな圧縮強度を有することなどの特徴が明らかになった。そしてこれらの特徴は、本解析で行った他の腐食鋼板の解析結果においても確認され、

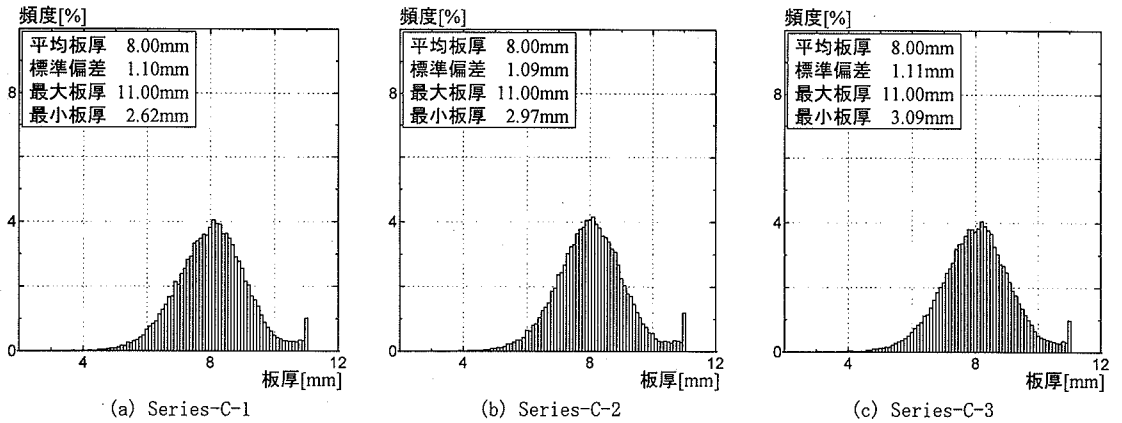


図-16 板厚ヒストグラム (Series-C)

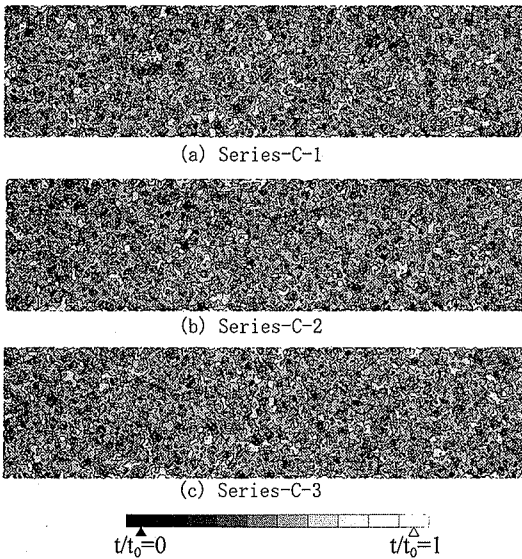


図-17 板厚等高線図 (Series-C)

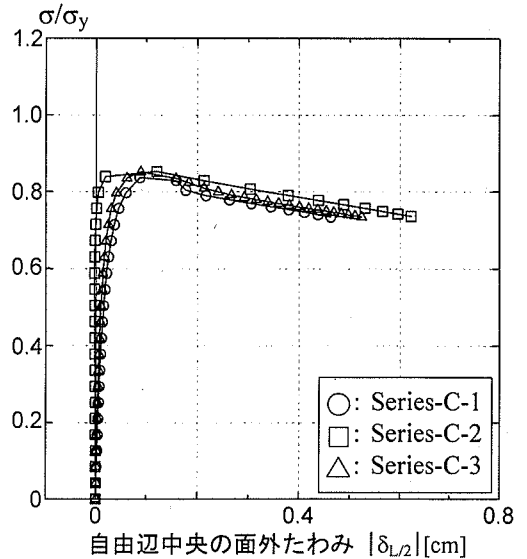


図-18 荷重-たわみ関係 (Series-C)

腐食表面の凹凸がより激しい(σ_t が大きい)ほど顕著に現れることがわかった。

(3) 圧縮強度評価における統計量の適用性

腐食フランジの平均板厚 t_{avg} 、板厚の標準偏差 σ_t および平均偏心量 e_{avg} が実測値と同一ならば、本解析モデルの圧縮強度は実験値と良く対応することを2.で示した。ここでは、腐食フランジの強度評価に対するこれらの統計量の適用性について、Series-B～Series-Eの解析結果から詳細に検討する。

a) 圧縮強度に対する板厚の標準偏差の影響

Series-Bの解析モデルの板厚ヒストグラムを図-13に示す。図から、Series-B-1のように板厚の標準偏差が大きいほど最大頻度は小さく、その分布幅が広がっていることがわかる。さらに、図-14に示す板厚等高線図では、標準偏差が大きいほど腐食による凹

凸が激しくなっている。

Series-Bの各腐食フランジの荷重-たわみ関係を図-15に示す。図から、標準偏差が大きいほど圧縮強度 σ_c/σ_y が大きくなっていることがわかる。これは、標準偏差が多きほど腐食深さのばらつきが大きいため、図-12に示すように、各点での偏心が大きくなるためと考えられる。とくに、標準偏差の大きいSeries-B-1($\sigma_t=1.01\text{mm}$)の圧縮強度は、同じ平均板厚であるにも関わらず小さい標準偏差のSeries-B-3($\sigma_t=0.34\text{mm}$)よりも16%程度高い結果となった。これは、同じ平均板厚を有するフランジでも、板厚ヒストグラムの分布形(標準偏差)によってその圧縮強度が異なることを示している。したがって、平均板厚のみでは腐食フランジの圧縮強度を十分な精度で評価できないことがわかる。

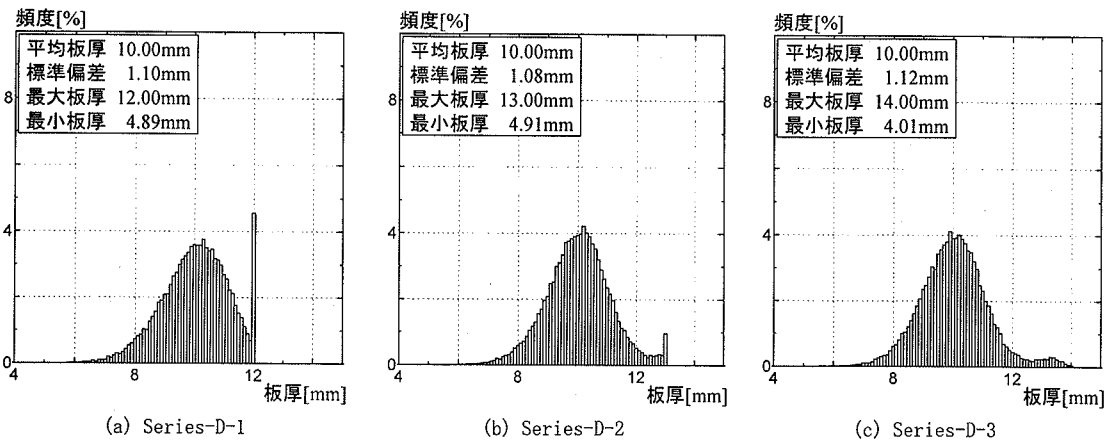


図-19 板厚ヒストグラム (Series-D)

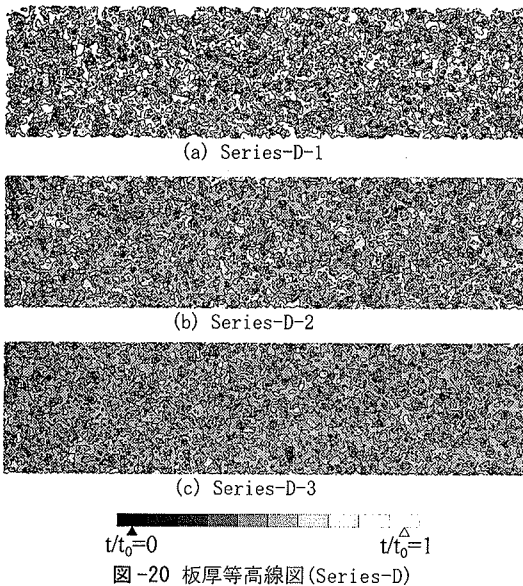


図-20 板厚等高線図 (Series-D)

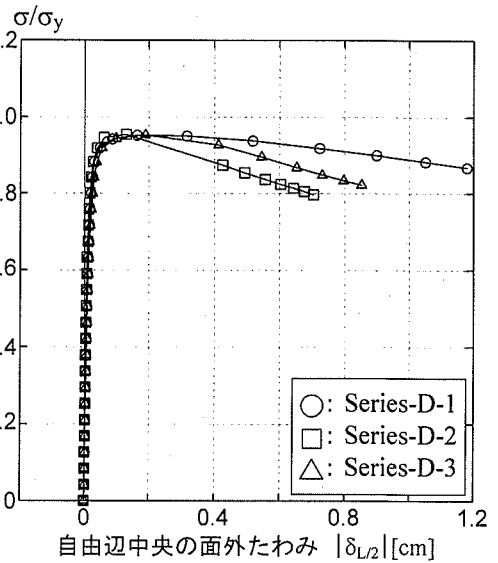


図-21 荷重-たわみ関係 (Series-D)

b) 偏心が無いフランジの強度評価に用いる統計量

平均板厚、標準偏差および平均偏心量 ($e_{avg}=0\text{mm}$) が等しい Series-C のフランジの板厚ヒストグラムを図-16 に示す。いずれの板厚ヒストグラムもほぼ同じ形状になっている。また、図-17 の板厚等高線図でも、腐食表面の凹凸状態はよく類似しているようにみえるが、最大腐食深や最小腐食深の位置は異なっている。

図-18 に Series-C の荷重-たわみ関係を示す。図から、3 つのフランジはほぼ同じ圧縮強度 ($\sigma_u/\sigma_y=0.85$) になることがわかる。これは、偏心が無い場合、それぞれのフランジの腐食表面形状が異なっても、平均板厚と標準偏差が同じならばその圧縮強度は変わらないことを示す。すなわち、偏心が無いフランジの強度評価のための統計量として、平均板厚の他に標準偏差を用いることで、より高い精度で強度評価が可能になることを図は示している¹⁷⁾。

c) 腐食前の板厚が圧縮強度におよぼす影響

腐食前の板厚 t_0 が異なる Series-D の板厚ヒストグラムおよび板厚等高線図を図-19 および図-20 に示す。これらの図から、腐食前の板厚が $t_0=12\text{mm}$ の Series-D-1 では腐食していない箇所が多く残されており、反対に $t_0=14\text{mm}$ の Series-D-3 では、初期の板厚を保っている部分はほとんどなく、腐食がかなり進展した状態になっている。

図-21 に示す Series-D のフランジの荷重-たわみ関係から、全てのフランジの圧縮強度は同じになっていることがわかる。これは、腐食後のフランジの平均板厚、標準偏差および平均偏心量が同じならば、腐食前の板厚はその圧縮強度に影響しないことを示す。

d) 偏心を有するフランジの強度評価に用いる統計量

Series-E のフランジは、同じ平均板厚、標準偏差および平均偏心量を持つという点では Series-C と同義

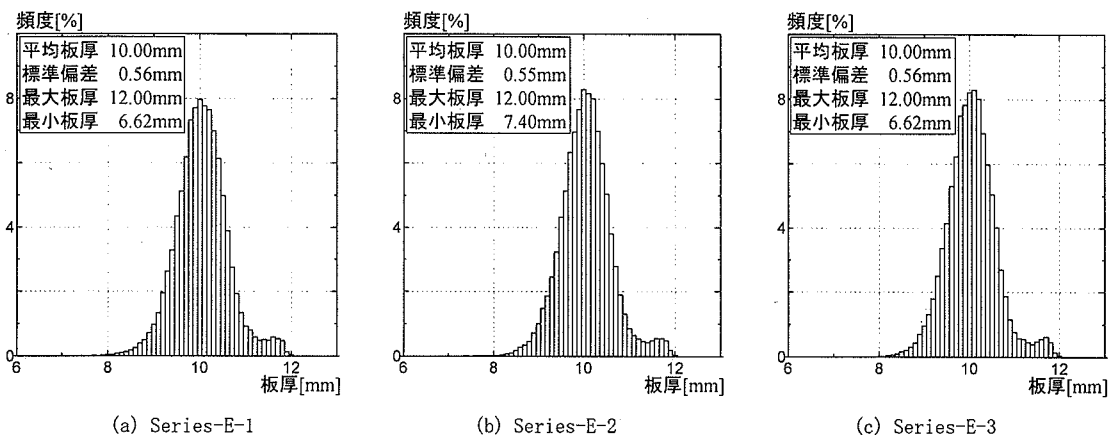


図-22 板厚ヒストグラム (Series-E)

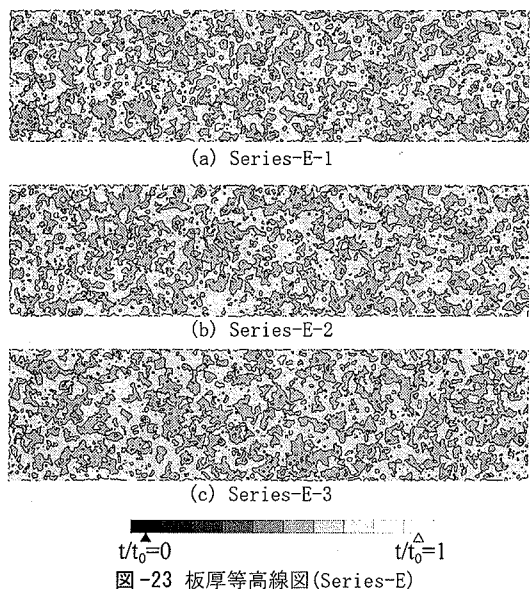


図-23 板厚等高線図 (Series-E)

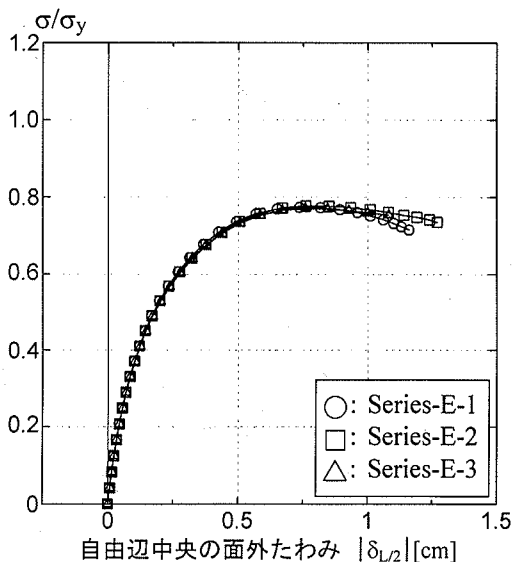


図-24 荷重-たわみ関係 (Series-E)

であるが、平均偏心量がゼロではないことがSeries-Cと異なる点である。

Series-Eのフランジの板厚ヒストグラム、板厚等高線図および荷重-たわみ関係を図-22～図-24に示す。これらの図から、各フランジの腐食表面形状が異なっても、腐食フランジの圧縮強度は同じであることがわかる。したがって、偏心を有する場合でも腐食フランジの圧縮強度は平均板厚、板厚の標準偏差および平均偏心量の3つの統計量を用いて表現できる。

ところで、腐食の形態には鋼板の両面に腐食を有する両面腐食と、鋼板の片面が激しく腐食する場合の片面腐食がある。本論文で採用した腐食フランジはいずれも両面腐食を想定している。論文中に示すことができなかったが、片面腐食の場合でも、平均板厚、標準偏差、平均偏心量が同じならば圧縮強度はほぼ同じとなることを確認している。

4. 腐食したフランジの圧縮強度評価法

腐食鋼板の強度評価法は、簡易かつ推定精度の良い方法が望ましい。ここでは、3. までに示した3つの統計量、すなわち平均板厚、標準偏差および平均偏心量を用いて、代表板厚 t_0 による腐食フランジの簡易な圧縮強度評価法について検討する。

(1) 偏心の無い腐食フランジの圧縮強度評価法

偏心の無い腐食フランジのパラメトリックな解析結果から得られた圧縮強度を図-25に示す。図中の実線はFEM解析から得られた腐食の無いフランジの座屈強度曲線を示し、腐食したフランジの解析結果を板厚の標準偏差 σ_t ごとに○□△でそれぞれ示す。図の縦軸は圧縮強度 σ_y/σ_y 、横軸は幅厚比パラメータ

$$R = \frac{b}{t_r} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (5)$$

である。ここで、 b :フランジの幅、 t_r :幅厚比パラメータ R を求めるための代表板厚、 σ_y :降伏応力、 E :弾性係数、 ν :ポアソン比、 k :座屈係数(0.425)である。

本研究では、代表板厚 t_r を幅厚比パラメータ R の板厚として用いた座屈強度曲線によって、腐食フランジの圧縮強度を評価する。

図-25の(a)と(b)はいずれも同じ解析結果であるが、代表板厚を $t_r = t_{avg}$ として幅厚比パラメータ R を求めた結果が図(a)であり、図(b)は代表板厚 $t_r = t_{avg} + 2\sigma_t$ を用いて解析結果を整理したものである。

図-25(a)より、代表板厚を $t_r = t_{avg}$ とした腐食フランジの圧縮強度は、腐食の無いフランジの座屈強度曲線よりも大きくなっていることがわかる。

一方、代表板厚を $t_r = t_{avg} + 2\sigma_t$ として幅厚比パラメータを求めると、図-25(b)に示すように、各腐食フランジの圧縮強度は腐食の無いフランジの座屈強度曲線上にほぼ一致するのがわかる。すなわち、偏心の無い腐食フランジの圧縮強度は、幅厚比パラメータ R に代表板厚 $t_r = t_{avg} + 2\sigma_t$ を適用することにより、腐食の無いフランジの座屈強度曲線を用いて評価できることを図は示している¹⁷⁾。

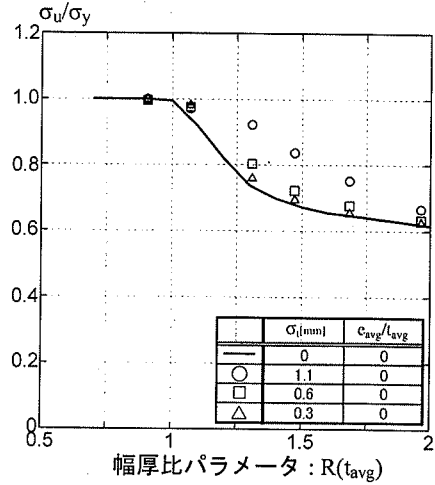
(2) 偏心を有する腐食フランジの圧縮強度評価法

腐食フランジの偏心の大きさを、平均偏心量と平均板厚の比 e_{avg}/t_{avg} を用いて表したパラメトリックな解析結果を図-26に示す。

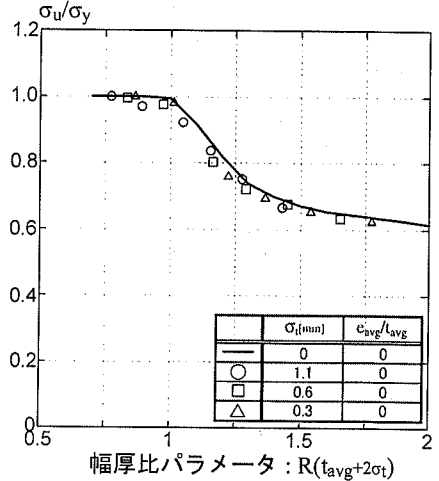
e_{avg}/t_{avg} の値は、文献7)で行われた腐食鋼板の板厚測定結果を参考にし、0.05, 0.10, 0.15を用いた。また、代表板厚を $t_r = t_{avg} + 2\sigma_t$ として幅厚比パラメータを求めた。偏心を有する腐食フランジの圧縮強度は、偏心の無いフランジ(図中実線)に比べて小さく、特に $R=1$ 付近で大きく低下することがわかる。

図-26で、破線は腐食の無いフランジに偏心を与えて解析した結果を示す。図から、腐食フランジの解析結果は、偏心を考慮した腐食の無いフランジの座屈強度曲線によく一致していることがわかる。よって、偏心を有する腐食フランジの圧縮強度は e_{avg}/t_{avg} を用いて偏心の大きさを表せば、偏心を考慮した腐食の無いフランジの座屈強度曲線から評価できる。

なお、標準偏差の大きい腐食フランジの圧縮強度は、 e_{avg}/t_{avg} が大きくなると、偏心を有する腐食の無いフランジの座屈強度曲線よりも若干大きくなる傾向がみられるが、これは安全側の評価を与えることになる。



(a) $t_r = t_{avg}$



(b) $t_r = t_{avg} + 2\sigma_t$

図-25 代表板厚 t_r と座屈強度曲線の適合性

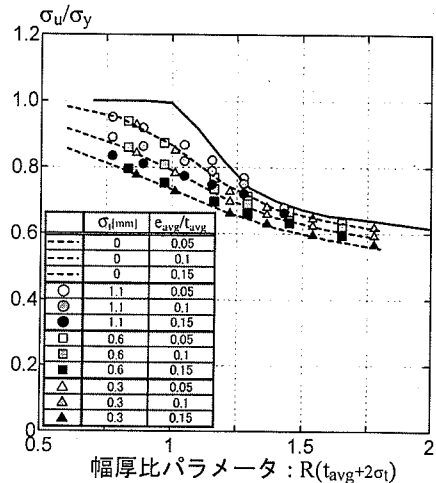


図-26 代表板厚 $t_r = t_{avg} + 2\sigma_t$ を用いた腐食フランジの座屈強度曲線

5. 結論

本論文では、圧縮を受ける腐食フランジのパラメトリックな強度解析結果からその終局挙動を調べ、簡易な圧縮強度評価法を検討した。本研究から得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) 実際の腐食鋼板を用いた圧縮試験結果との比較から、腐食鋼板の圧縮強度解析において板要素が適用できることを示した。
 - (2) 空間的自己相関モデルによって作成した腐食表面を用いた解析モデルの座屈強度は、平均板厚、標準偏差、平均偏心量を実際の腐食鋼板と同じにすれば、実験結果と良く一致することを確認した。
 - (3) 腐食フランジの終局挙動について、板厚の標準偏差が大きくなると圧縮強度は上昇する傾向を示し、腐食が無いフランジとは異なる崩壊形式となることを示した。また、最高荷重後の耐力低下が大きくなる等の力学的特性を明らかにした。
- 以上の検討結果に基づき、腐食した圧縮フランジの簡易強度評価法に関して、
- (4) 腐食したフランジの圧縮強度は、平均板厚、板厚の標準偏差および平均偏心量を用いて評価できる。
 - (5) 代表板厚 $t_R = t_{avg} + 2\sigma_t$ (t_{avg} : 平均板厚, σ_t : 板厚の標準偏差) を用いて幅厚比パラメータを求めれば、腐食したフランジの圧縮強度は、腐食の無いフランジの座屈強度曲線から精度良く評価できる。
 - (6) 平均偏心量と平均板厚の比 e_{avg}/t_{avg} を用いて偏心を考慮すれば、偏心を有する腐食フランジの強度は、偏心を考慮した腐食の無いフランジの座屈強度曲線から評価できる。

なお、本論文中では示せなかったが、片面腐食の場合も本圧縮強度評価法は適用できることがわかった。

謝辞：本研究は、中国電力技術研究財団の試験研究助成、および(社)日本鉄鋼連盟の土木鋼構造教育助成を受けて行った。ここに記して心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室：既設橋の架替実態に関する調査，土木技術資料，No. 40-4，pp. 38-43，1998。
- 2) 名取暢：鋼橋の腐食事例とその対策，第1回鋼構造の維持管理に関するシンポジウム資料集，1997。

- 3) 松本勝，白石成人，三宅広昭：鋼橋の腐食劣化の評価に関する研究，構造工学論文集，Vol. 38A，pp. 1097-1102，1992。
- 4) 松本勝，白井義朗，中村幾雄，白石成人：腐食鋼板の有効板厚評価法の一提案，橋梁と基礎，Vol. 23，No. 12，1989。
- 5) 村中昭典，皆田理，藤井堅：腐食鋼板の表面形状と残存耐力，構造工学論文集，Vol. 44A，pp. 1063-1071，1998。
- 6) 藤井堅：腐食した鋼材の材料特性と残存耐力評価法，第1回鋼構造物の維持管理に関するシンポジウム資料集，pp. 21-30，1999. 7。
- 7) Fujii, K., Satoh, M., Minata, O., Ohmura, H. and Muranaka, A.: A Proposal on Effective Thickness for Evaluation of Buckling Strength of Corroded Steel Plate, *Proc. of the 5th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, pp. 2105-2110, 1995.
- 8) 鈴村恵太，中村俊一，樽井敏三：腐食した橋梁用垂鉛めっき鋼線の強度特性，土木学会論文集，No. 731/I-63，pp. 367-377，2003. 4。
- 9) 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，pp. 141-151，2002. 7。
- 10) 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. 642/IV-50，pp. 109-116，2000. 3。
- 11) 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，pp. 1031-1038，2002。
- 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，pp. 687-696，2003。
- 13) 森猛，渡辺一，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，pp. 675-686，2003。
- 14) 野上邦栄，山沢哲也，小栗友紀，加藤美幸：腐食減厚に伴う合成I桁及びI断面柱の残存耐力評価に関する一考察，構造工学論文集，Vol. 47A，pp. 93-102，2001。
- 15) 中沢正利：腐食鋼板の圧縮耐力特性，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，Vol. 55，CS-86，2000。
- 16) 社団法人日本鋼構造協会：既設鋼橋部材の耐力・耐久性診断と補修・補強に関する資料集(鋼橋の維持管理とそれを支える要素技術)，JSSCテクニカルレポート No. 51，2002。
- 17) 海田辰将，藤井堅：腐食フランジの残存圧縮居度に対する評価指標の提案，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，Vol. 57，I-275，2002。

(2003. 6. 5 受付)

A SIMPLE ESTIMATION METHOD OF COMPRESSIVE STRENGTH FOR CORRODED FLANGE PLATES

Tatsumasa KAITA, Katashi FUJII and Hideharu NAKAMURA

This paper presents a simple estimation method of the remaining compressive strength for corroded flange plates. Non-linear finite element analyses of compression flange plates with corroded surface generated by the spatial auto-correlation model were performed parametrically using isoparametric shell elements.

From the numerical results, it is concluded that the compressive strength of corroded flange plates can be estimated from the buckling strength curve of corrosion-free plate by using two parameters, $t_R = t_{avg} + 2\sigma_1$ and e_{avg}/t_{avg} , where t_R =representative thickness for rating width-thickness ratio, t_{avg} =average thickness, σ_1 =standard deviation of plate thicknesses and e_{avg} =average eccentricity.