

腐食鋼板のせん断耐力とその評価法

Strength and its rating method of corroded rectangular steel plates subjected to shear force

海田 辰将*, 藤井 堅**, 原 考志***, 中村 秀治****, 上野谷 実*****

Tatsumasa Kaita, Katashi Fujii, Takashi Hara, Hideharu Nakamura

*工修, 広島大学大学院博士課程後期, 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1丁目4番1号)

**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番1号)

***広島大学大学院博士課程前期, 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1丁目4番1号)

****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番1号)

*****工博, 福山大学教授, 工学部 (〒729-0292 広島県福山市学園町1番地三蔵)

This paper presents a simple estimation method of the remaining shear strength for corroded rectangular plates. Non-linear finite element analyses of corroded rectangular plate subjected to pure shear force were performed parametrically using shell elements. Corroded surfaces for the analyses were generated by using the spatial auto-correlation model artificially. Moreover, for comparison with the analytical result, a shear loading test focused attention on the ultimate shear strength of a corroded web panel was conducted using an actual corroded plate girder. From the numerical results, it was concluded that the shear strength of corroded rectangular plates can be estimated from the buckling strength curve of corrosion-free plate by using only average thickness independently of condition of surface irregularities.

Key Words: Corrosion, Strength Estimation, Shear strength, Maintenance

キーワード: 腐食, 強度評価, せん断強度, 維持管理

1. はじめに

性能照査型設計法における維持管理では、現時点の構造物の保有性能(ここでは主に耐力)を正確に評価する必要がある。しかしながら、鋼構造物の腐食に関しては、腐食した部材あるいは構造物の残存強度を精度良く評価できる技術が未だ確立されていない。これは、腐食鋼材の残存強度が、腐食表面の凹凸状況だけでなく、応力状態にも大きく影響を受けること起因すると考えられる。したがって、腐食した部材あるいは構造物の耐力をより高精度で評価するためには、腐食減肉や鋼材表面の凹凸状況を考慮することはもちろんのこと、部材の応力状態を考慮して強度を支配する因子(たとえば圧縮の場合は曲げ剛性、引張の場合は凹凸に起因する応力集中など)までも的確に捉えることができる信頼性の高い残存強度評価法の早期確立が望まれる。

これまでに、腐食鋼材の引張および疲労強度に関して、腐食した試験片を用いた実験的な評価がなされており、平均板厚や標準偏差等の統計量を用いた有効板厚が提案されている^{1)~4)}。また、圧縮については腐食鋼材の座屈試験結果⁵⁾に基づいたFEM解析により、圧縮フランジの強度評価法および評価指標が提案されている^{6), 7)}。これらの残存強度評価法では、表面の凹凸状況だけでなく、部材の応力状

態を考慮して、それぞれ異なる統計指標や評価方法が提案されている。

ところが、せん断を受ける腐食部材については、ウェブを部分的に切削することにより腐食減肉を模擬した鋼桁の載荷試験が行われている⁸⁾が、実際の腐食表面の凹凸を考慮した強度評価は行われていない。さらに、プレートガーダーの腐食で最も多い損傷箇所が、せん断力の卓越する支承部付近であることを考えると、腐食鋼板のせん断強度評価法を確立することは工学的に重要な課題であるといえる。

そこで本論文では、有限要素法によるせん断強度解析をパラメトリックに行い、その結果から腐食鋼板の簡易なせん断強度評価法を提案することを目的とする。また、今回著者らは102年供用後、著しい腐食のために撤去されたプレートガーダーを入手する機会を得たので、このプレートガーダーを用いてせん断強度試験を行い、その実験結果も踏まえてせん断強度評価法を検討する。

2. 腐食鋼板のせん断強度解析

2.1 解析方法

(1) 弾塑性有限要素解析

本研究で行った解析は、汎用構造解析プログラムABAQUS

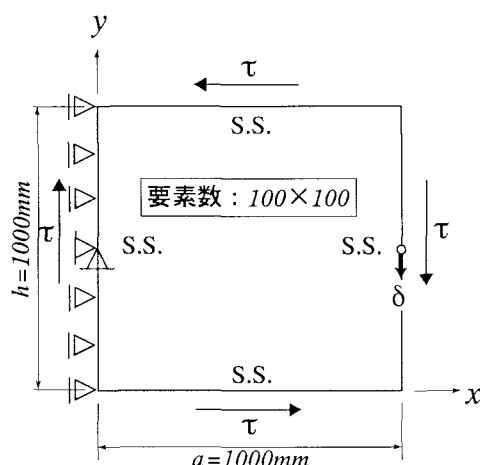


図-1 解析モデル

によるFEM大変形弾塑性解析である。要素は4節点シェル要素を用いた。応力-ひずみ関係は完全弾塑性とし、Misesの降伏条件を用いた。材料特性は、降伏応力 $\sigma_t=270\text{MPa}$ 、弾性係数 $E=206\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ を用いた。

図-1に解析モデルを示す。本解析ではモデルの寸法は $1000\text{mm} \times 1000\text{mm}$ (アスペクト比 $\alpha=1.0$)で一定としている。正方形要素の幅は 10mm で、要素分割数は 100×100 である。境界条件は、図-1に示すように、面内方向変位について

は、辺 $x=0$ で x 方向変位を拘束し、点 $(x, y) = (0, a/2)$

で y 方向変位を拘束した。他方、面外変位(たわみ)は周辺単純支持とした。荷重条件は、図-1に示すようにモデルの周辺に等分布せん断応力 τ を作用させた。また、解析には弧長増分法を用いた。腐食の影響は、節点の板厚データに考慮している。なお、溶接等による残留応力は考慮していない。

一般に、板の耐力力が残留応力と初期たわみに大きく影響されることは、すでに周知の事実であり、溶接プレートガーダーのウェブのせん断耐力を正確に推定するためには、溶接構造物では不可避ともいえるこれらの初期不整を考慮すべきであるのは言うまでもない。しかしながら、本研究で残留応力を考慮しなかったのは次の理由による。すなわち、腐食減肉にともなって、腐食のない状態での残留応力の自己釣合状態が崩れ、板内部の残留応力分布は変化する。さらに、残留応力の変化に応じて、厳密には自己釣合となるように変形が起こるので、初期たわみも変化すると思われる。そして、腐食した状態での残留応力分布や初期たわみの変化は、未だ明らかにされていないのが現状である。したがって、残留応力分布を仮定してそれを考慮した耐力力解析は容易にできるが、その分布を仮定することにおいて信頼性は低いと判断される。また、必ずしも正確とはいえない残留応力を考慮して解析することは、現象が複雑化するので、腐食の影響を把握するという意味において必ずしも得策とはいえない面もある。さらに、せん断を受けるウェブパネルの極限強度には、残留応力はあまり影響しないことも報告されている¹²⁾。したがって、今回は、残留応

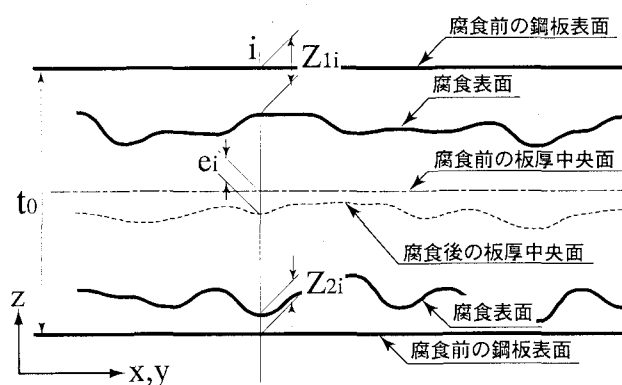


図-2 腐食の前後で変化する板厚中央面

力は考慮しないこととした。また、初期たわみについても腐食の影響を際立たせて現象の把握を容易にするという目的から考慮しないこととした。

なお、今回の比較のために行った荷重供試体はリベット構造であり、この場合の初期たわみと残留応力は、溶接構造と異なってきたと小さいと考えられる。腐食鋼板の初期不整の変化およびその強度への影響の解明は今後の重要課題といえる。

(2) 腐食表面形状の作成方法

本解析に用いた腐食表面は、文献10)に示されている方法と同様、ポアソン分布によって発生させた独立腐食深に空間的自己相関モデルを適用し、腐食の空間的な広がりを考慮して作成している。また、解析した鋼板には、表面全体に腐食を有するような腐食形態を想定した。

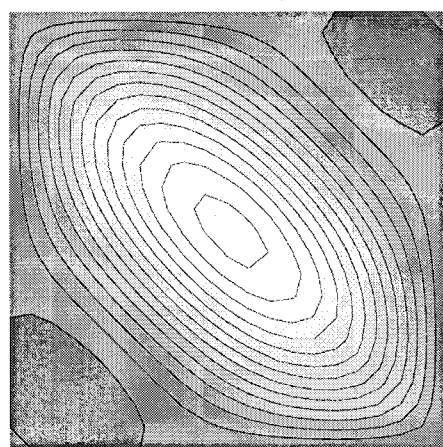
鋼板の腐食深データは、表裏それぞれの面に対して別々に作成したものを用い、鋼板上に 5mm 間隔で与えている。また、解析では腐食前の板厚 t_0 を設定し、解析に用いる板厚データは、両表面の腐食深を t_0 から差し引いて求めた。この板厚データは鋼板上に 5mm 間隔で与えられることになるが、解析に考慮する際には、要素の節点(10mm 間隔)周りの板厚データの平均板厚を節点の板厚として与えている。

また、鋼板が腐食減肉すると、板厚中央面は図-2に示すように元の位置から変化する。いま、図-2に示すように鋼板上の格子点 i で両表面がそれぞれ Z_{1i} および Z_{2i} だけ腐食すると

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

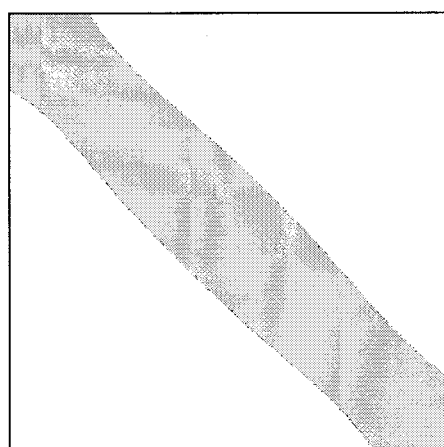
だけ腐食前よりも板厚の中心が移動するため、荷重に対して偏心が生じる。本解析では、腐食深から計算した e_i を各節点の z 座標として与えることにより、偏心の影響を考慮している。そこで、腐食鋼板ごとの相対的な偏心の大きさを表す指標としてここでは式(2)に示す平均偏心量

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



-5 たわみ (mm) 10

a) 最高荷重時のたわみ



b) 最高荷重時の塑性域

図-3 斜張力場発生後の崩壊(model 2)

を用いた。

2.2 せん断を受ける腐食鋼板の終局挙動

本解析によって得られた最高荷重時のたわみ形を図-3に示す。図は腐食の無い板厚8mmの鋼板(アスペクト比 $\alpha=1.0$)の解析結果である。図中の影付き領域は要素の中央面が降伏していることを示す。図に示すような斜張力場の発生後の崩壊は、本研究で行ったほとんどの解析モデルで確認された。図-3のような座屈崩壊は、腐食の激しいモデルにおいても多数確認されてたが、腐食した鋼板の解析結果の中にはこのような崩壊形式を示さなかったものも幾つかあった。その一例を、図-4の荷重-変位関係に示す。横軸は図-1に示すモデル右端での鉛直変位 δ を示す。縦軸はモデルのせん断応力 τ を降伏せん断応力 τ_y で除して無次元

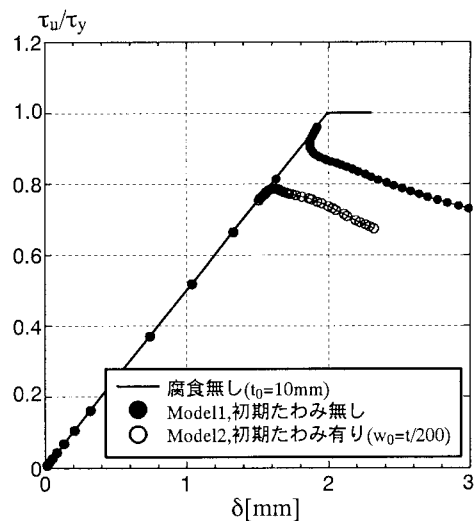
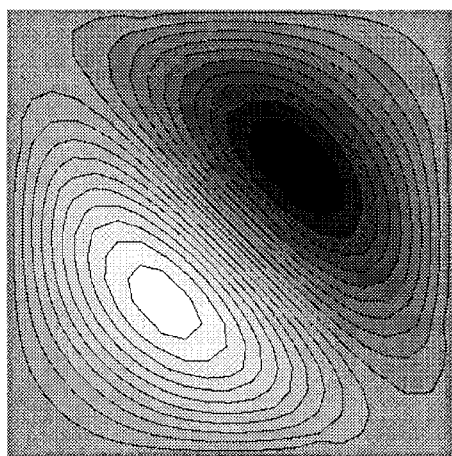
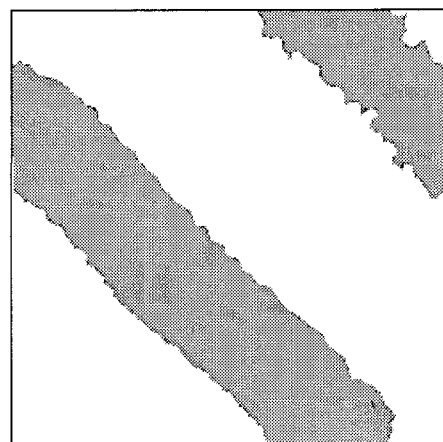


図-4 荷重-変位曲線



-2.5 たわみ (mm) 2.5

a) 最高荷重時のたわみ



b) 最高荷重時の塑性域

図-5 終局時の Model 1 のたわみと塑性域の状況図

表-1 解析モデルの各統計量

解析モデル	t_0 [mm]	t_{avg} [mm]	σ_t [mm]	e_{avg} [mm]	t_{max} [mm]	t_{min} [mm]	τ_u/τ_y
B1	8.00	8.00	0.00	0.00	8.00	8.00	0.74
C1	10.00	8.00	1.00	1.00	10.00	1.85	0.75
C2	9.00	8.00	0.50	0.50	9.00	4.10	0.74
C3	10.00	8.00	0.29	0.00	8.74	6.19	0.74

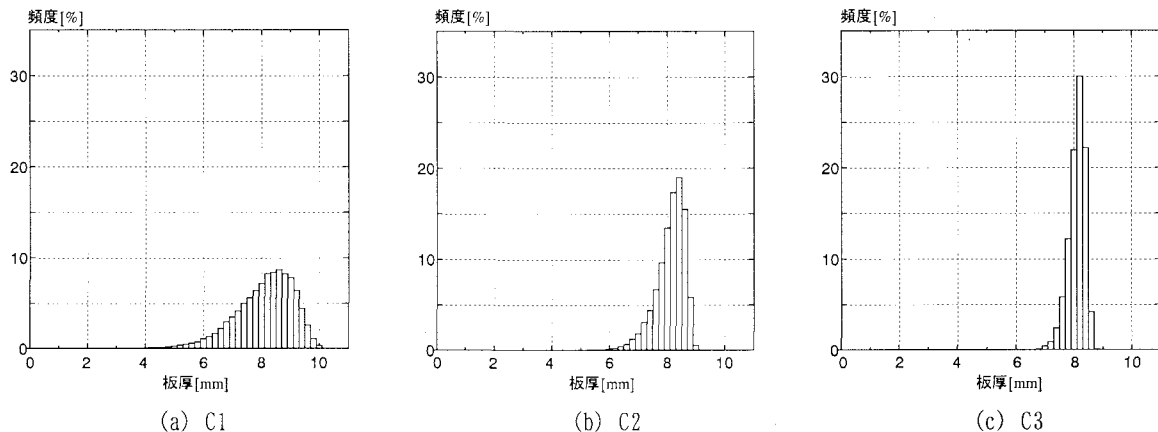


図-6 解析モデルC1-C3の板厚ヒストグラム

化した強度である。図-4のModel1および2は、腐食前板厚 $t_0=10\text{mm}$ から平均板厚 8.38mm まで腐食減肉したと想定したものであるが、Model1とModel2の極限せん断強度 τ_u/τ_y （最高荷重）は大きく異なっているのが図からわかる。この2つのモデルの腐食表面は同じ腐食深データから作成されており、同じ凹凸形状を有しているが、両者の違いは初期たわみの有無だけである。すなわち、Model1では初期たわみを考慮していないが、Model2では次式で表されるsin半波形のわずかな初期たわみを与えている。

$$w(x, y) = w_0 \sin \frac{\pi}{a} x \cdot \sin \frac{\pi}{a} y \quad (3)$$

ここに、最大初期たわみ w_0 は、 $w_0 = \frac{t_{avg}}{200} = 0.04\text{mm}$

であり、座標系は図-1に示すように決める。

上式に示すように、最大初期たわみは平均板厚の1/200(0.04mm)で、あまり大きなものではないにもかかわらず、極限強度には大きな差を生じている。このことは、初期たわみは腐食鋼板のせん断強度に大きく影響することを示唆している。今回の解析では初期たわみを考慮していないが、これについては今後解明すべき問題といえる。

なお、上記の極限強度の差は、Model1とModel2の座屈モードが異なることに起因する。すなわち、Model1では、腐食に起因して現れる表面の凹凸によって、板の中央面が面外に移動して載荷面とずれることが初期たわみとなって現れるため、図-5に示すような高次のたわみ形をとる崩

壊性状が現れることがある。これに対し、Model2では、与えた初期たわみに起因して図-3のような座屈モードとなったと考えられる。

2.3 せん断強度評価のための統計量

腐食鋼板のせん断強度評価に用いる統計量を検討するために、表-1に示すモデルについて解析を行った。表中、B1は板厚8mmの腐食の無いモデルであり、C1～C3については平均板厚のみが $t_{avg}=8\text{mm}$ で等しく、標準偏差や平均偏心量などの他の統計量はそれぞれ異なっている。図-6および図-7にC1～C3の板厚ヒストグラムと板厚等高線図を示す。これらの図から、3つのモデルの表面形状は互いに異なる表面形状およびヒストグラムの分布形であることがわかる。

図-8に表-1で示したモデルの解析結果から得られた荷重-板中央の面外たわみ関係を示す。図から、C1～C3のモデルの極限強度は $\tau_u/\tau_y=0.74$ であり、3ケースともほぼ一致していることがわかる。これは、それぞれの鋼板の腐食表面形状が異なっても、平均板厚が同じならばその極限せん断強度は変わらないことを示す。すなわち、鋼板全面に腐食を有する鋼板のせん断強度を評価するための統計量として、平均板厚のみを用いれば強度評価が可能となることを図は示している。

さらに、腐食鋼板C1～C3の極限強度は、これらの平均板厚と同じ板厚を有する腐食の無いモデルB1の強度とも一致している。これは、腐食表面の凹凸状況に関係なく平均板厚だけで強度が決まるならば、腐食がない状態(すなわち標準偏差 σ_t がゼロの状態)も腐食表面の特別な場合と考えれば理解できよう。そして、これらの結果は、腐食の無い鋼

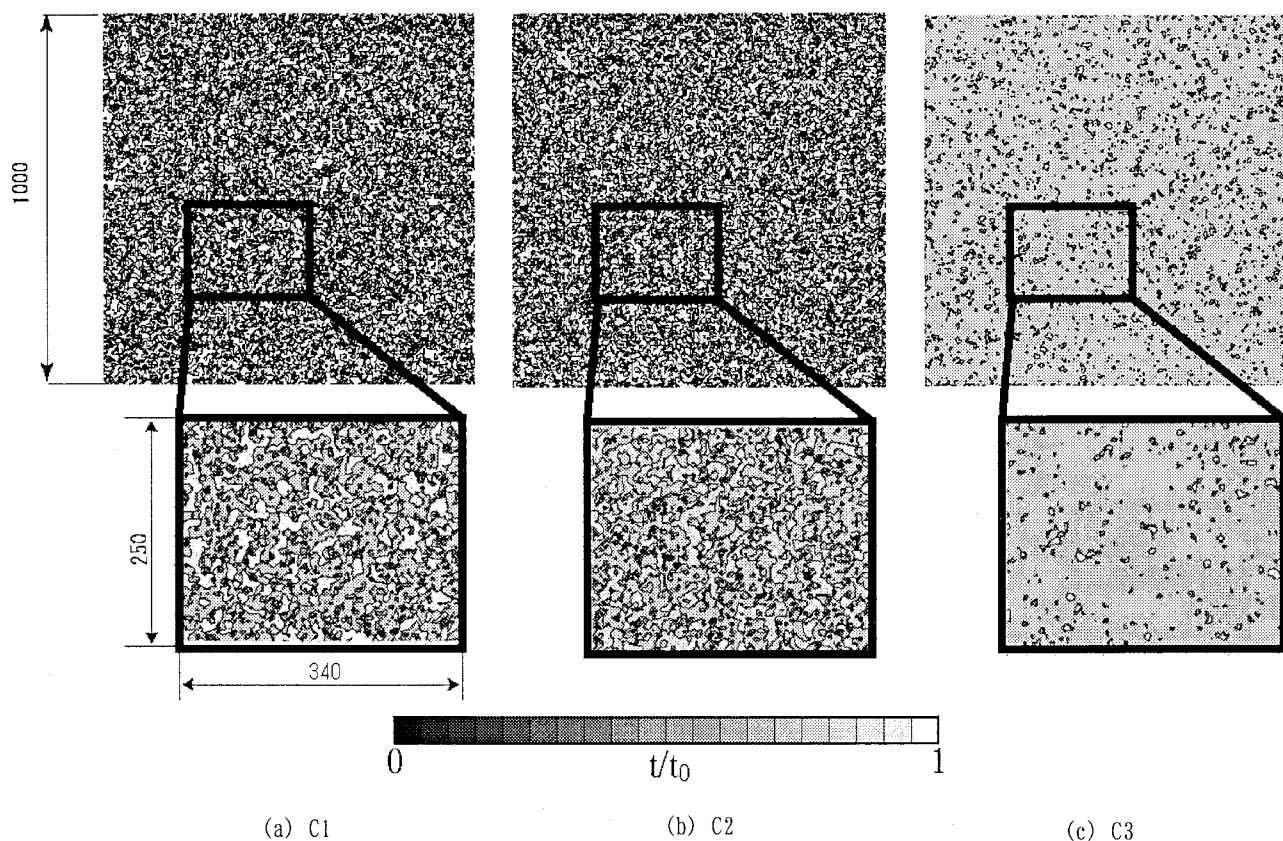


図-7 解析モデルC1-C3の板厚等高線図

板のせん断強度を用いて腐食鋼板のせん断強度を推定できる可能性を示唆している。

なお、モデルC1～C3のそれぞれの平均偏心量 e_{avg} の大きさが異なっていることから、圧縮を受ける場合と異なり、腐食にともなう板厚中央面(偏心)の変化が強度に与える影響は小さいと判断できる。

3. 腐食したプレートガーダーのせん断強度実験

3.1 供試体概要

せん断強度実験および腐食表面形状の測定を行った供試体は、高知県穴内川河口において102年間供用され、2002年に著しい腐食のために撤去された6径間単純支持プレートガーダー橋(総リベット接合)の主桁の一部である。架設当初は鉄道橋として供用されていたが、1975年に歩道橋に用途を変更された。本橋が設置された場所は離岸距離約200mであり、常時太平洋からの強い潮風を受けていたと考えられる。主桁はスパン13.5mであり、供試体は主桁の桁端から2.5mの位置で切り出した支承部を用いて作成した。図-9に供試体の寸法を、写真-1に切り出した直後の供試体のウェブを示す。せん断試験は、写真のウェブに着目して行った。

3.2 腐食表面形状の測定

(1) 測定方法

供試体の上下フランジ、ウェブ、エンドプレートについて

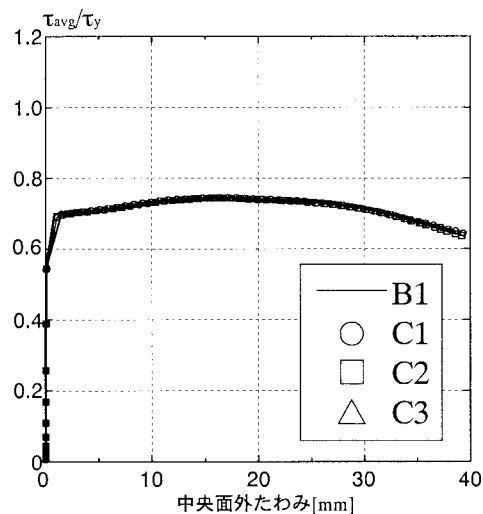


図-8 荷重-中央点面外たわみ曲線

て、腐食表面形状の測定を行った。ウェブについては表裏の全面を計測した。表面の錆や塗装は、腐食の凹凸状態を変化させないように、細かい砂を含む高圧水を噴射する方法によって除去した。表面形状の測定にはポータブル3次元計測システムを採用した。この計測システムは、センサーを腐食表面に接触・移動させることで、任意に設定した座標系を用いて接触点の3次元座標を連続かつ細かいピッチ(測線方向に約1～2mm)で記録できる。なお、ポータブル3次元計測システムの精度については、先端に取り付けたセ

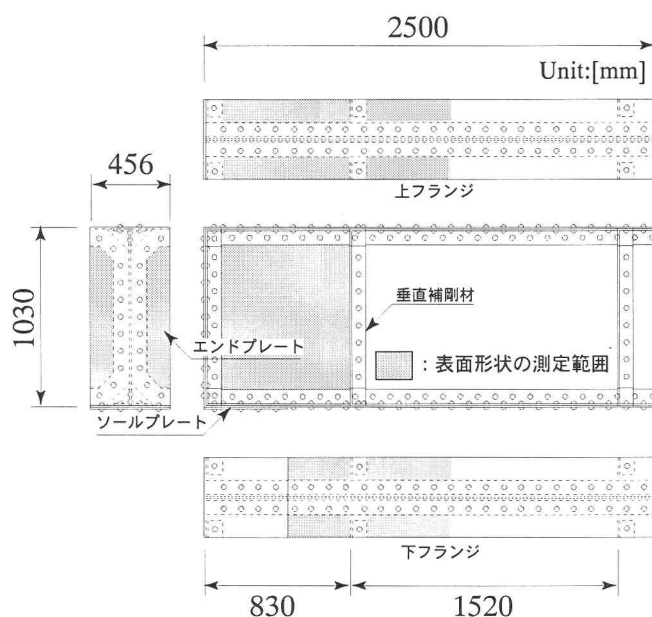


図-9 供試体寸法

ンサーの種類によって異なるが、本研究で行った接触式プローブを用いた場合、表面の座標は $\pm 0.1\text{mm}$ 以内の誤差であった。

測定した座標データは、場所的に偏りをもっているため、統計処理を行って平均板厚等を求めるには等間隔のデータに修正する必要がある。そこで、本研究では座標データを鋼板上で 5mm メッシュの等間隔に修正した。その詳細は文献11)および12)に示している。

鋼板各点の残存板厚は、 5mm 間隔に修正された鋼板裏表の座標データを差し引いて求めた。また、本供試体に関する設計時の図面の大半は入手できなかったので、腐食していないと思われる箇所の板厚(最大板厚にほぼ一致する)を設計時の板厚 t_0 とみなした。

(2) 測定結果

図-10 および図-11 に腐食表面形状の測定から得たウェブの板厚等高線図および板厚ヒストグラムを示す。

ウェブでは下フランジ側の隅角部に若干局所的な激しい腐食がみられるものの、緩やかな凹凸を有する腐食が全面に広がっている。また、エンドプレート側に近いほど減肉が多くなるような若干の腐食の偏りが現れているが、等高線間隔もかなり広がっており、ヒストグラムも標準偏差が比較的小さく、平均板厚付近に頻度が集中している形状となっていることから、ほぼ一様に腐食が分布する腐食形態であると判断される。

また、図-12に板の中央面の z 座標(偏心量に対応するが、測定機の座標を示し、荷重載荷面からの偏心ではない)のヒストグラムを示す。図から、腐食に伴う板中央面の最頻値からの移動量は、 $\pm 0.5\text{mm}$ 程度であることがわかる。このことから、先に述べたように、リベット橋のウェブの初期たわみは、かなり小さいことがわかる。

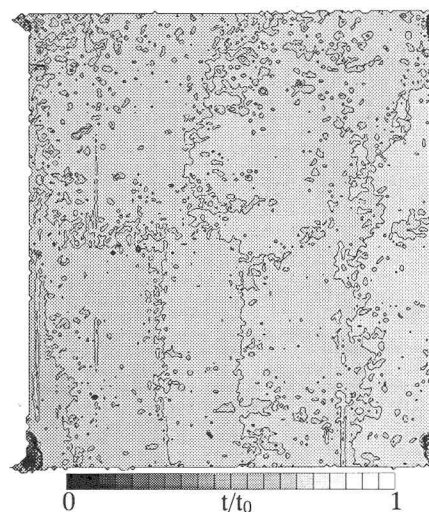


図-10 供試体ウェブの板厚等高線図



写真-1 支承部付近におけるウェブの外観

3.3 せん断強度試験方法

本プレートガーダーは、鋼材の機械的性質および材料特性が全く不明である。そこで、せん断載荷試験に先立って、桁から採取した鋼材の両面を平滑仕上げして作成したJIS5号試験片を用いて引張試験を行った。その結果を表-2に示す。表から、今回の鋼材は現在のSS400相当の性能をほぼ同等であることがわかった。

図-13にせん断強度試験の概略および測定機器の配置を、写真-2に載荷装置の外観を示す。載荷は、 2940kN 油

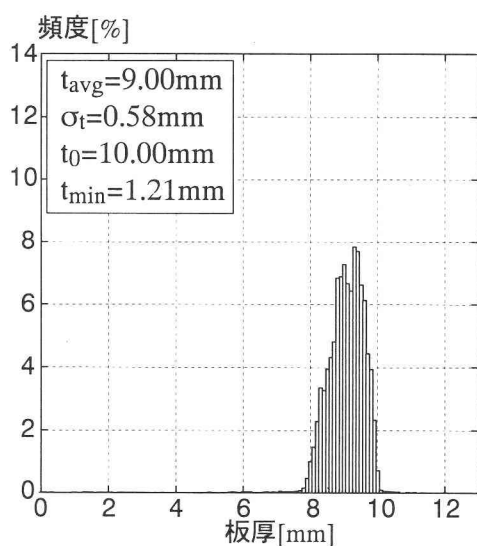


図-11 供試体ウェブの板厚ヒストグラム

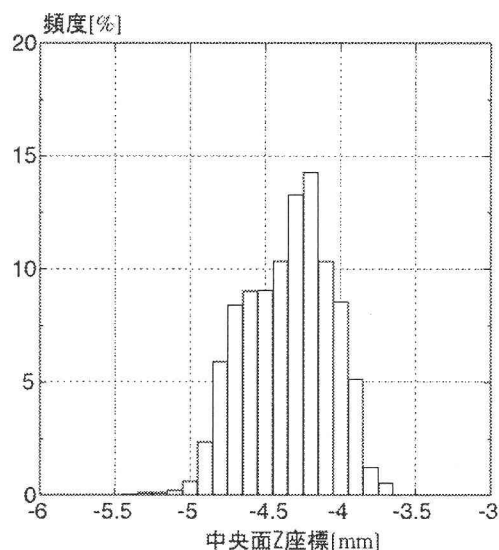


図-12 中央面のZ座標のヒストグラム

表-2 供試体の材料特性

試験片	弾性係数[GPa]	降伏応力[MPa]	ポアソン比	引張強度[MPa]	伸び[%]
上下フランジ	199	309	0.27	419	19.3
ウェブ	193	291	0.28	415	20.8
平均	196	300	0.28	417	20.1

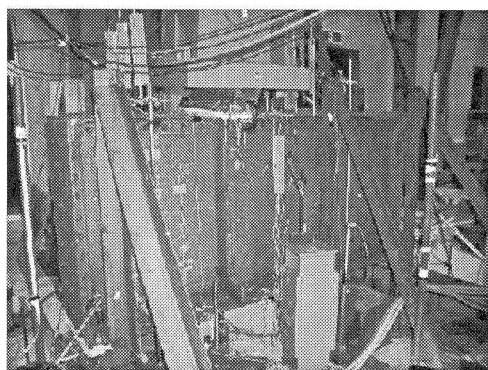


写真-2 荷重装置

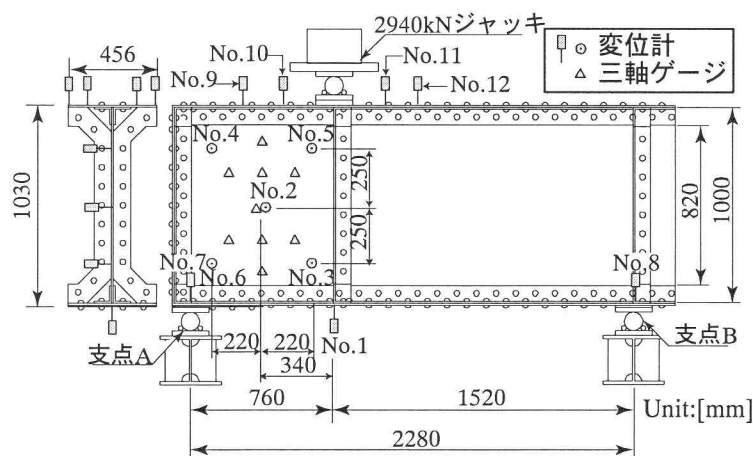


図-13 セットアップした供試体と測定機器の配置

圧ジャッキを用いて行い、着目ウェブに作用する曲げの影響をできるだけ抑えるため、図に示すように支点Aから760 mmの位置にある垂直補剛材上で1点集中荷重とした。支持条件は両端単純支持である。荷重は1500kN付近まで荷重制御で荷重し、その後、崩壊に至るまで変位制御で荷重した。

ひずみの測定は、ウェブに三軸ゲージを取り付けて行った。なお、荷重中のフランジの応力状態を確認するために荷重点付近の上下フランジにも単軸ゲージを取り付けている。また、図-13で示した箇所に変位計を設置し、荷重点

での桁たわみ、ウェブの面外たわみ、支点の沈下量、上フランジのねじれ角を測定した。

3.4 実験結果と考察

本供試体は荷重点下にL型アングルの垂直補剛材を有する。この垂直補剛材は荷重にともなうフランジのねじれに対する剛性を十分有していると思われたが、荷重開始直後から上フランジのねじれ角が漸増し、荷重1750kNで荷重できなくなったため、一旦除荷した。その後、板厚22mmの鋼板を高力ボルト接合する方法で垂直補剛材を補強し、再度

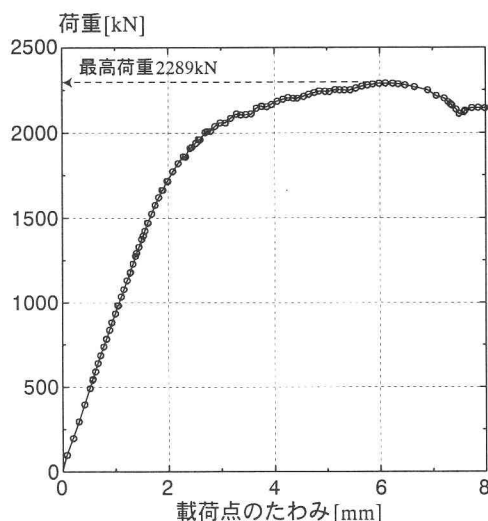


図-14 荷重-桁たわみ(載荷点)関係

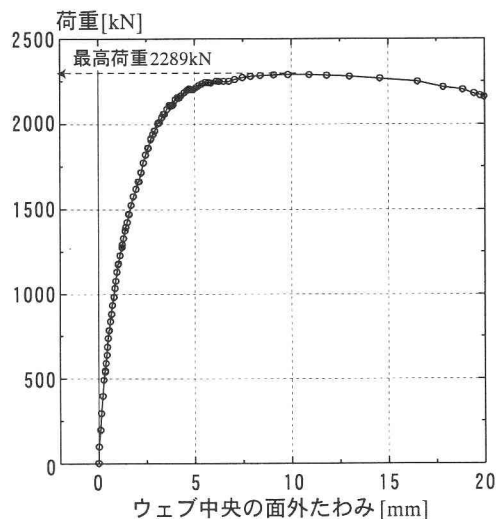


図-15 荷重-ウェブ中央面外たわみ関係

載荷を行った。

その結果、荷重2000kN付近から急激に変位が増大し、最高荷重2289kNで着目ウェブのせん断座屈によって桁が崩壊した。最高荷重に対応する支点A上での最大せん断力は1526kNである。このときの図-14に荷重-桁たわみ関係を、図-15に荷重-ウェブ中央面外たわみ関係を示す。また、写真-3に実験終了後のウェブの崩壊性状を示す。ウェブの面外たわみは最高荷重に達する直前に急増しており、ウェブに取り付けたひずみゲージの値も、多くが最高荷重時に塑性ひずみを越えていた。これらのことから、ウェブは塑性せん断座屈によって崩壊したと判断できる。

4. 腐食鋼板のせん断強度評価法

腐食鋼板の残存強度評価法は、簡単で高精度なものが望ましい。そのために、著者らは文献6), 7)で、腐食した圧縮フランジの簡易強度評価法として、腐食の無いフランジの座屈強度曲線を用いて腐食フランジの強度が推定できることを提案した。そこで、本研究においても、腐食の無い鋼板の座屈強度曲線を用いた腐食鋼板のせん断強度評価法について、パラメトリック解析結果から検討した。

図-16に腐食鋼板の解析結果、実験結果を示す。図の縦軸は極限せん断強度 τ_u/τ_y を横軸は幅厚比パラメータ

$$R = \frac{h}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (4)$$

を示している。ここで、 h : 鋼板の高さ、 t : 板厚、 σ_y : 降伏応力、 E : 弾性係数、 ν : ポアソン比、 k : アスペクト比 α から求められる座屈係数である。図中の実線は本解析から得られた腐食の無い鋼板のせん断座屈強度曲線($\alpha=1$)である。図-16にプロットした腐食鋼板の解析結果および実験結果は、 τ_u/τ_y および式(4)の幅厚比パラメータの板厚 t に、それぞれ平均板厚 t_{avg} を適用したものである。なお、解析での

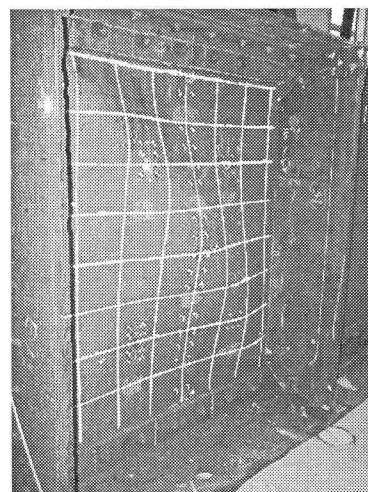


写真-3 崩壊性状

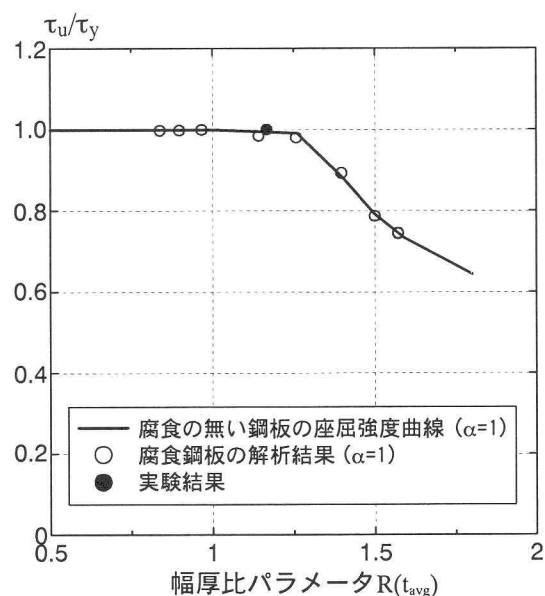


図-16 平均板厚を用いた座屈強度曲線

腐食表面は各々異なる凹凸形状を有している。

実験結果による極限強度 τ_u/τ_y は、次のようにして求めた。本供試体のようにL型アングルでリベット接合されたプレートガーダーでは、L型アングルで囲まれたウェブ以外の桁断面(たとえばL型アングルによる接合部)においてもかなりのせん断力を負担していると考えられる。そこで、本研究では実験から得られた極限せん断力1526kNからせん断流理論に基づき、桁断面のせん断応力分布を求め、L型アングルで囲まれた着目ウェブパネルが純粋に負担する極限せん断力 V_u を算定した。その際、断面の計算にはフランジおよびウェブのそれぞれの平均板厚を用いた。そして、

$$\frac{V_u}{V_y} = \frac{\tau_u \cdot h \cdot t_{avg}}{\tau_y \cdot h \cdot t_{avg}} = \frac{\tau_u}{\tau_y} \quad (5)$$

となることから降伏せん断力 V_y を用いて極限強度 τ_u/τ_y を求めた。この結果を図-16中に解析結果と併せて●印で示している。

図から、平均板厚を用いて幅厚比パラメータを求めると、腐食鋼板の解析結果および実験結果は、腐食の無い鋼板の座屈強度曲線によく一致していることがわかる。腐食した鋼板の極限せん断強度は、平均板厚を用いて幅厚比パラメータを求めることにより、腐食の無い鋼板の座屈強度曲線から推定できることを図は示している。

なお、図-16に示した解析結果は、それぞれ0～1mmの大きさで異なる平均偏心量を有しているモデルを解析した結果である。しかし、平均板厚のみを用いて前述したように強度評価できるということから、0～1mm程度の平均偏心量がせん断強度に与える影響は小さいと考えられる。

5. まとめ

本研究では、腐食を考慮した周辺単純支持板のパラメトリック強度解析と腐食した実際のプレートガーダーを用いたせん断強度実験結果から、腐食鋼板のせん断強度評価のための統計量とその簡易な強度評価法について検討した。本研究から得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 鋼板全面がほぼ同じ凹凸状態で腐食した形態を有する腐食鋼板の極限せん断強度は、平均板厚を用いて幅厚比パラメータ R を求めれば、腐食の無い鋼板の座屈強度曲線から精度良く評価できる。
- (2) 人工的に作成した腐食表面を用いた本解析モデルの座屈強度は、実験から得られた実際の腐食ウェブの極限強度とよく一致した。なお、供試体ウェブの極限強度を求めるには、平均板厚を用いて梁理論より計算された断面のせん断応力分布からウェブの平均せん断応力を計算した。
- (3) 腐食による板厚中央面の変化が0～1mmの範囲では、せん断強度に与える影響は小さい。

謝辞

本研究で行ったプレートガーダーの実験では、高知県坂上高義氏をはじめ、腐食表面計測では、ミツトヨ(株)、豊稷技研(株)、また、載荷実験では福山大学中村雅樹助手の多大な御協力を賜った。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 海田辰将, 藤井堅, 中村秀治: 腐食したフランジの簡易な圧縮強度評価法, 土木学会論文集(投稿中)
- 7) Kaita, T., Fujii, K. & Okumura, M.: Ultimate Strength Analysis of Corroded Plates Under Compression. *Proceedings of the First International Conference on Civil and Environmental Engineering*, pp. 69-77, 2002.
- 8) ポータンフン, 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および解析, 構造工学論文集, Vol. 48A, pp. 1099-1105, 2002. 3.
- 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. 642/IV-50, pp. 109-116, 2000. 3.
- 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, pp. 1031-1038, 2002.
- 11) 藤井堅, 原考志, 海田辰将, 上野谷実, 有尾一郎: 腐食した総リベット橋のせん断耐力試験, 鋼構造年次論文報告集, 第11巻, pp. 495-502, 2003. 11.
- 12) 奈良敬, 出口恭司, 福本ゆう士: 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, Vol. 392/I-9, pp. 265-271, 1988. 4.
- 13) T. Kaita, T. Hara, K. Fujii & H. Nakamura: Measurement of surface irregularities and shear loading test of corroded plate girder, *First International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure / SHMII-1*, Vol. 1, pp. 659-671, 2003.
- 14) 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.

- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.710/1-60，pp.141-151，2002.7.

(2003年9月12日受付)