

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

A Study on the simulation of corroded steel plate surface and bending capacity of I-shaped girder with corrosion

森 猛*, 渡邊 一**, 正井 資之**

Takeshi Mori, Hajime Watanabe, Tadashi Masai

*工博, 法政大学教授, 工学部土木工学科 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2)

**法政大学大学院修士課程, 工学研究科建設工学専攻 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2)

Corrosion is typical damage on steel bridges, but the evaluation method for capacity of steel member with corrosion has not been clear. The estimation about repair of corroded steel member is usually done on the basis of corroded area and/or corrosion depth. However, it makes the estimation more reasonable that the relationship between the corrosion and capacity of the member is clear. In this study, examination of corrosion configuration using actual corroded steel member has been done, and modeling of the configuration is discussed. Furthermore, bending capacity of I-shaped beam with corrosion on the lower flange is discussed by using three-dimensional elastic-plastic finite element analysis.

Key Words: corrosion, simulation, I-shaped girder, bending capacity, section loss percentage

キーワード: 腐食, シミュレーション, I断面桁, 曲げ耐力, 断面欠損率

1. はじめに

鋼橋で最も代表的な劣化損傷は腐食である。腐食した部材は、断面欠損に伴ってその性能が低下する。特にわが国の鋼橋は、温暖かつ湿潤な気候で海洋からの塩分飛来もある苛酷な腐食環境下にあるものも少なくない。そのため、著しい腐食の発生が原因で架け替えに至った例もある¹⁾。

腐食はその分布状況から全面腐食と局部腐食に大別される。全面腐食は鋼材の表面全体が腐食・減厚する現象であり、鋼材を大気や海水などほぼ様な腐食環境中にさらした際に生じやすい。一方、局部腐食は材質や腐食環境、腐食反応が不均一な場合に進行する腐食現象であり、部分的に深い孔状や溝状の腐食形状となる。これらの腐食損傷を補修すべきか否かは腐食の程度(腐食部分の表面積や腐食深さ)を基に判断される。しかし、腐食の程度と耐力の関係が明らかになれば、さらに合理的な判断が可能になるものと考えられる。また、腐食の形状によっても耐力が変化することは容易に想像できるが、腐食の形状的特徴も十分には明らかとされていないのが現状であろう^{2)~3)}。また、腐食したランダムな表面腐食形状を有する鋼桁の曲げ耐力についても明らかとはなっていない⁹⁾。

ここでは、実橋より撤去した腐食鋼板の表面形状の測定を行い、その測定結果から腐食形状の特徴を調べるとともにその模擬方法について検討する。この結果に基づいて模擬した表面腐食形状を有する鋼I桁、および単純

な局部腐食形状・全面腐食形状を有する鋼I桁の曲げ耐力について3次元弾塑性有限要素法を利用して検討する。これらの解析の狙いは、腐食部材の曲げ耐力を支配するパラメータを明らかにすること、そしてそのパラメータを使って腐食部材の耐力を容易に評価する手法を模索することにある。すなわち、腐食部材のどこをどの程度測定すれば、腐食部材の曲げ耐力評価が可能となるかを示すことを目的とした。

2. 腐食した鋼板の腐食性状調査

2.1 試験片と腐食形状測定方法

試験片は、以下に示す3橋から採取されたものである。

A 橋梁(穴吹橋)¹⁰⁾: 平成5年度に撤去された板桁橋であり、その縦桁を対象とした。

B 橋梁: 内陸部の河川を跨ぐ下路アーチ橋である。老朽化および耐力向上を目的として平成4年度に架け替えられた。試験片は横構より採取した。

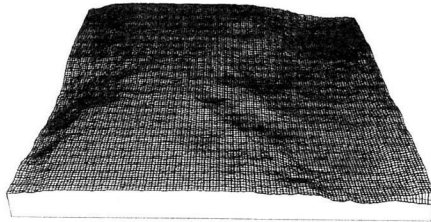
C 橋梁: 河口部に位置するトラス橋であり、著しい腐食のために取り替えられた横構を対象とする。

A 橋梁については、旧建設省土木研究所と橋梁建設協会の共同研究の報告書¹⁰⁾に記載されているデータを利用した。そこでは、桁軸直角方向に5mm間隔、桁軸方向で50mmあるいは100mm間隔で腐食深さが測定されている。

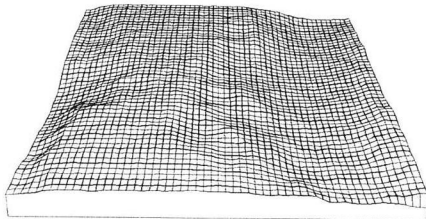
B, C 橋梁については、デジタル式の可動台車の上に資料を載せてレーザ変位計(測定範囲±15mm, レーザ



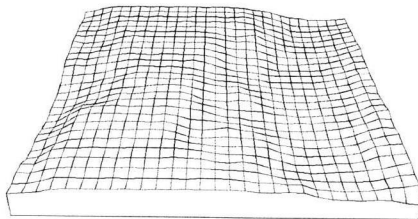
写真



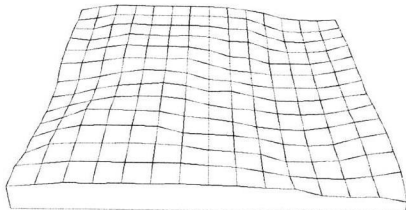
1.0mm 間隔



2.5mm 間隔



5.0mm 間隔



10.0mm 間隔

図・1 腐食形状の測定例

スポット径 $70\mu\text{m}$ 、分解能 $3\mu\text{m}$ で表面腐食形状を測定した。なお、測定は、間隔 1.0mm を基本とし、正方形の格子状に行った。一部の試験片については、測定間隔を変え ($1.0\sim 10.0\text{mm}$)、また複数の箇所を測定した。ここで行った測定のデータは計 27 組である。

なお、腐食深さの測定は腐食の著しい面について行ったが、その裏面はいずれの試験片においても比較的平らであり、著しい腐食はなかった。

2.2 測定間隔と測定結果

測定間隔を $1.0, 2.5, 5.0, 10.0\text{mm}$ と変えて測定した

表-1 試験体の腐食概要

試験体	腐食深さ (mm)		腐食断面積 (mm^2)	
	最大	平均	最大	平均
No.1	12.88	4.82	72.12	57.39
No.2	8.13	3.37	69.68	56.26
No.3	15.68	2.63	48.89	30.29
No.4	9.59	2.07	21.63	9.61

腐食形状を試験片の写真とともに図-1 に示す。いずれの測定結果も右側の大きく抉れた腐食の状態をよく再現しているものの、ほぼ中央部の小さな凹部が重なり合った腐食形状の表現に違いが見られる。測定間隔が $5, 10\text{mm}$ のものはこの部分の形状の再現が曖昧となっているが、測定間隔が $1.0, 2.5\text{mm}$ の場合には、特に差は認められない。測定間隔をより小さくすればよりシャープに腐食形状をとらえる事ができるが、 2.5mm 以下の測定間隔であれば十分に腐食形状を再現できると考えられる。

2.3 腐食形状の特徴

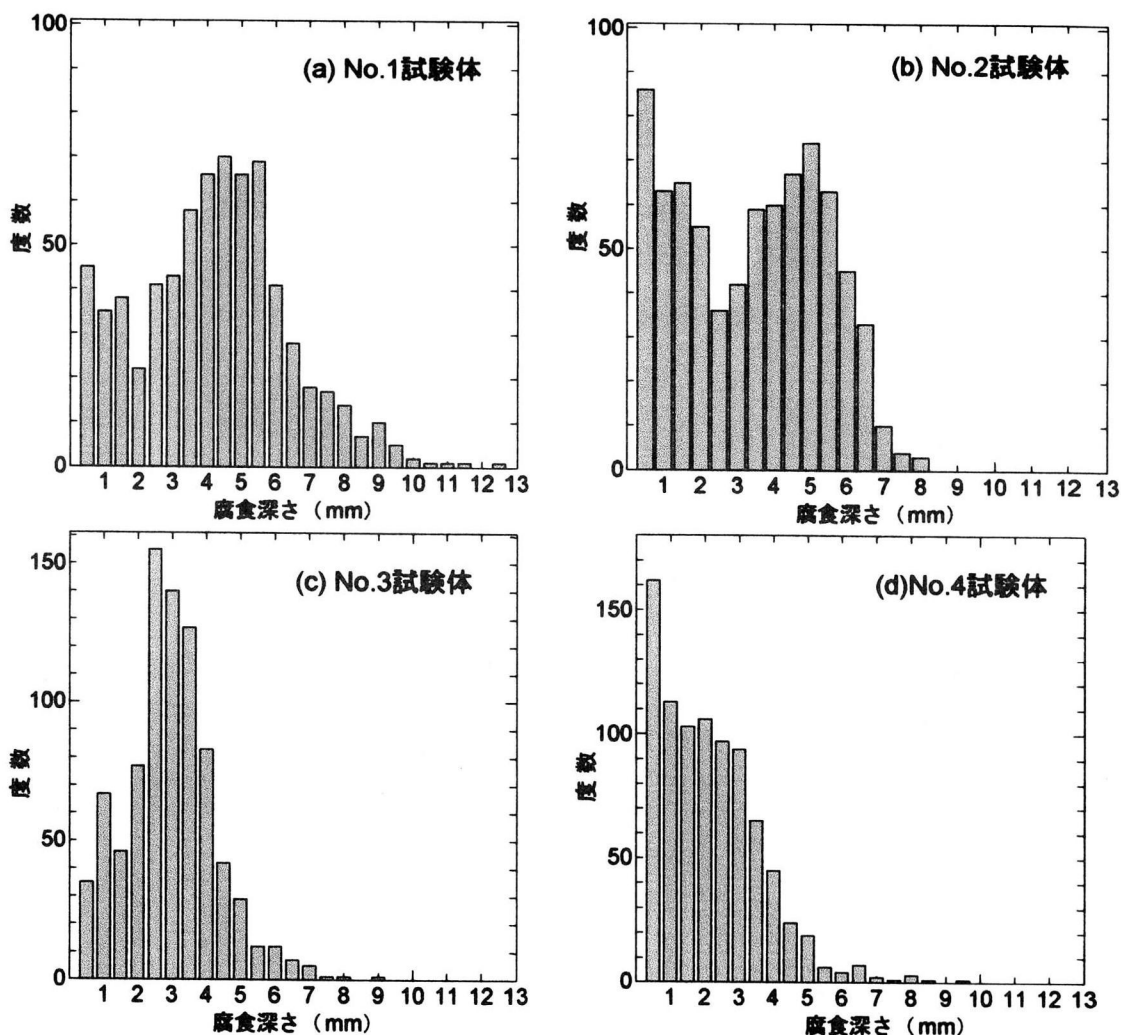
A 橋 (穴吹橋) の腐食形状の測定は、特に腐食が著しかった縦桁 4 体の上フランジについて行われている。試験対象とした各縦桁試験体の腐食概要を表-1 に示す。腐食は、縦桁試験体 No. 1 で最も著しく、次いで縦桁試験体 No. 2, No. 3, No. 4 の順となっている。

図 2(a)-(d) に各縦桁試験体で測定された腐食深さの頻度分布を示す。腐食が最も著しかった試験体 No. 1 での腐食深さは、 $4.0\sim 5.5\text{mm}$ で頻度が高く、そこを最頻値とする偏った正規分布に従うように分布している。試験体 No. 2 では、No. 1 と比べて腐食深さ $0.5\sim 2.0\text{mm}$ での頻度が高くなっているものの、その分布形状は試験体 No. 1 と類似している。試験体 No. 1, No. 2 と比べて、若干腐食が軽微である縦桁試験体 No. 3 での腐食深さの頻度分布は、深さ 3mm を最頻値とする正規分布にほぼ従っている。腐食が最も軽微であった試験体 No. 4 の腐食深さの頻度分布は、試験体 No. 1, No. 2, No. 3 とは異なり、腐食深さ 0 で最も頻度の高い半正規分布となっている。

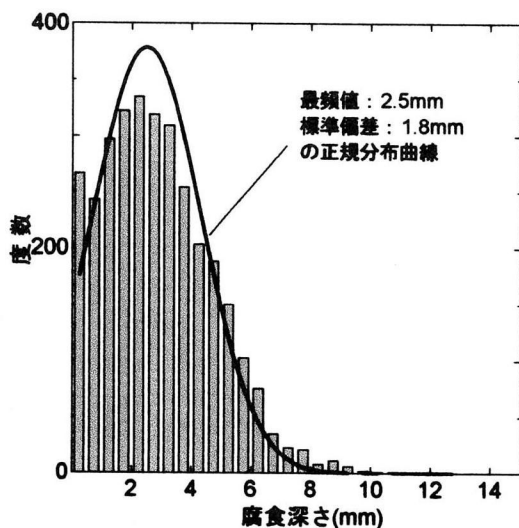
図-3 に試験体 No. 1, No. 2, No. 3, No. 4 で測定したすべての腐食深さデータの頻度分布を示す。この頻度分布から求めた腐食深さの平均値は 3.2mm 、標準偏差は 1.8mm であった。図-3 中に示す曲線は、最頻値の腐食深さを測定結果に合わせて 2.5mm 、標準偏差を 1.8mm として描いた正規分布である。この曲線は、腐食深さの分布とよく一致している。

以上から類推すれば、腐食の進行に伴って、腐食深さの頻度分布は図-4 に示す順序で進行するものと考えられる。すなわち、腐食が軽微な間の腐食深さは、その最頻値が 0 で標準偏差の小さな正規分布にしたがい、腐食が進むに従って標準偏差が大きくなる。さらに、腐食が進むと、腐食深さの標準偏差は同じで、最頻値となる腐食深さが大きくなる。

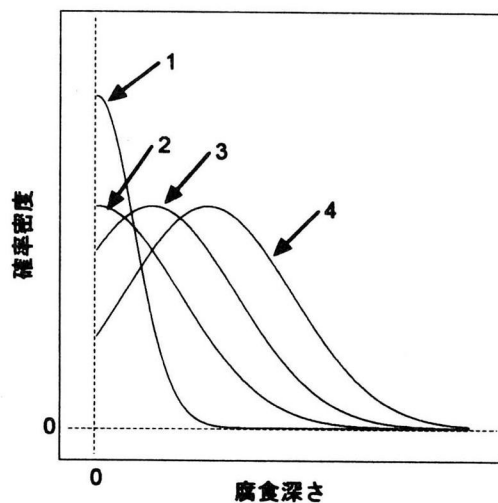
レーザ変位計で測定した各試験片の腐食深さの平均値、標準偏差、最大腐食深さを、各試験片の測定範囲とともに



図・2 各縦桁上フランジの腐食深さの頻度分布



図・3 腐食深さの頻度分布 (穴吹橋合計)



図・4 腐食進行のモデル図

に表-2 に示す。

図-5(a)～(d)と図-6(a)～(d)は、0.2mm 間隔で整理した腐食深さの度数分布、着目する点に隣接する点の腐食深さの頻度分布、隣接する点の最大・平均・最小腐食深さ、隣接する点の腐食深さの標準偏差と着目する点の

腐食深さの関係の例を示している。ここで示すデータは、いずれも 1mm 間隔で格子状に測定した腐食深さである。隣接する点とは、着目する点を格子状に囲む 8 つの点のことである。

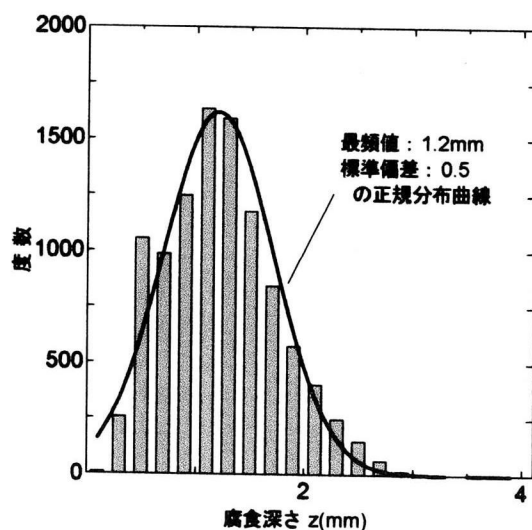
図-5(a)、図-6(a)中に示す実線は、度数分布から得ら

れた最頻値と標準偏差を用いて描いた正規分布である。
ここで示した2例は、いずれもほぼ正規分布に従っている。
他のデータも、ほぼ正規分布に仕上がっていた。

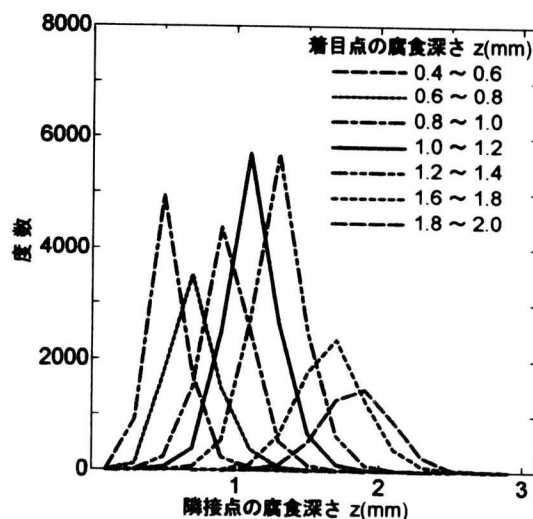
図-5(b)、図-6(b)より、隣接点の腐食深さは、ほぼ着
目点の腐食深さを最頻値とする正規分布に従うと判断で
きる。他の測定データにおいても同様の傾向が認められ

表-2 レーザ変位計で測定した試験片の概要

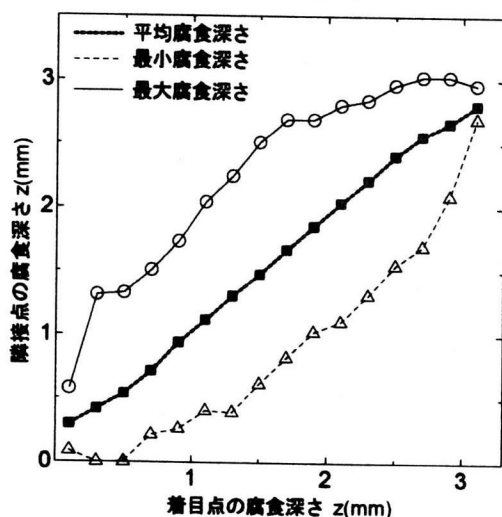
試験片名		平均腐食深さ (mm)	標準偏差 (mm)	最大腐食深さ (mm)	測定間隔 (mm)	測定範囲(mm)
B 橋試験片	その 1	1.25	0.45	2.62	1.0	50×90
		1.09	0.46	2.22	2.5	
		0.94	0.45	2.12	5.0	
	その 2	1.23	0.52	3.03	1.0	200×50
		1.14	0.52	2.91	2.5	
		1.00	0.52	2.73	5.0	
		0.91	0.53	2.40	10.0	
	その 3	0.58	0.29	1.88	1.0	100×50
		0.52	0.28	1.88	2.5	
		0.54	0.29	1.74	5.0	
C 橋試験片 No.1	その 1	1.44	0.68	2.69	1.0	40×40
	その 2	1.97	0.77	3.56	1.0	40×40
C 橋試験片 No.2	その 1	1.40	0.66	3.36	1.0	40×35
	その 2	1.39	0.69	2.77	1.0	40×40



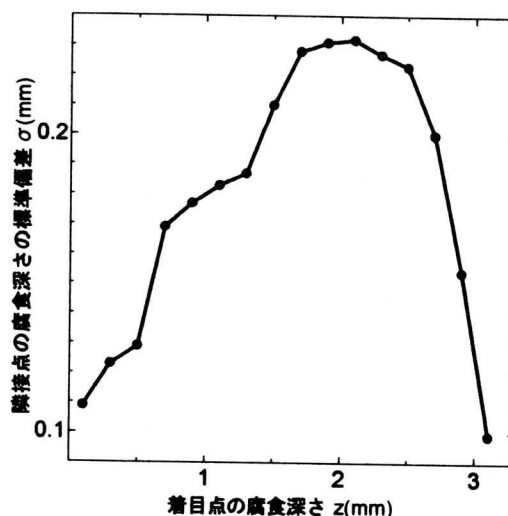
(a) 全体の度数分布



(b) 隣接点の腐食深さの分布



(c) 隣接点の最大・平均・最小腐食深さ



(d) 隣接点の腐食深さの標準偏差

図-5 B橋の腐食深さの測定例

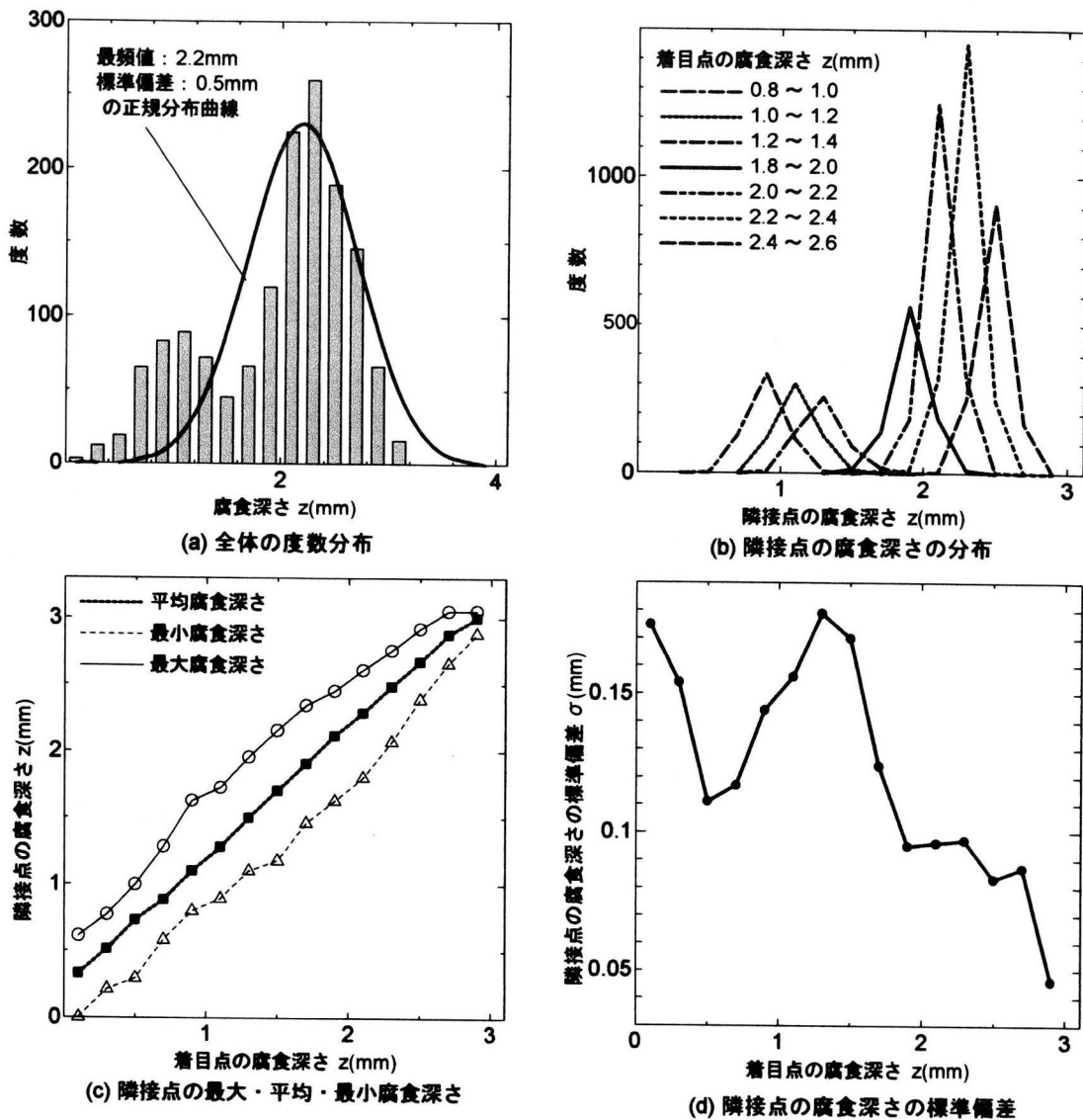


図-6 C橋の腐食深さの測定例

た。

図-5(c)と図-6(c)は、隣接する点の平均・最小・最大腐食深さと着目点の腐食深さの関係を示したものである。いずれの場合も隣接する点の深さの平均腐食深さは、着目点の腐食深さとほぼ一致している。また、隣接点の最大腐食深さと最小腐食深さは、ばらつきが大きいものの、平均腐食深さを示す線とほぼ平行となっている。これは、隣接する点の腐食深さが、その着目点の腐食深さに対してある程度の制限（勾配の制限）が存在することを意味しているものと考えられる。すなわち、腐食深さが急変することは無く、腐食は比較的滑らかな形状をしていると言える。このような傾向は他の測定データにおいても同様であった。

着目点の腐食深さごとに、隣接点の腐食深さの標準偏差を示したのが、図-5(d)と図-6(d)である。着目点の腐食深さとの相関は認められない。

2.4 腐食した鋼板の表面形状シミュレーション法

前章の検討により、①腐食深さは正規分布に従う、②ある着目点に隣接する点の腐食深さは着目点の腐食深さを最頻値とする正規分布に従う、ことが明らかとなった。本章では、これらの性質を利用して腐食鋼板の表面腐食形状を模擬する手法を以下のように考えた。なお、隣接点の腐食深さの標準偏差は一定とする。

- (i) 腐食を模擬する鋼板を基盤の目状に分割し、それぞれの交点に一樣乱数を利用してランダムに番号付けを行う。
- (ii) ボックス・ミュラー法を用いて作成した正規乱数を利用して所定の正規分布（最頻値、標準偏差、最大値、最小値）に従う腐食深さの順列を作成する。
- (iii) (i)で設定した番号1の交点に(ii)の順列1番の腐食深さを与える。この腐食深さを順列より削除する。
- (iv) 交点2が交点1に隣接しているかどうかを判断する。隣接していれば、順列1番の腐食深さが②の条件を満たしているかどうかを判断する。この判断は、一樣乱数を発生させ、その大きさと隣接点の正規分布

最頻値： μ 標準偏差： σ
 隣接点の腐食深さの標準偏差： σ_N

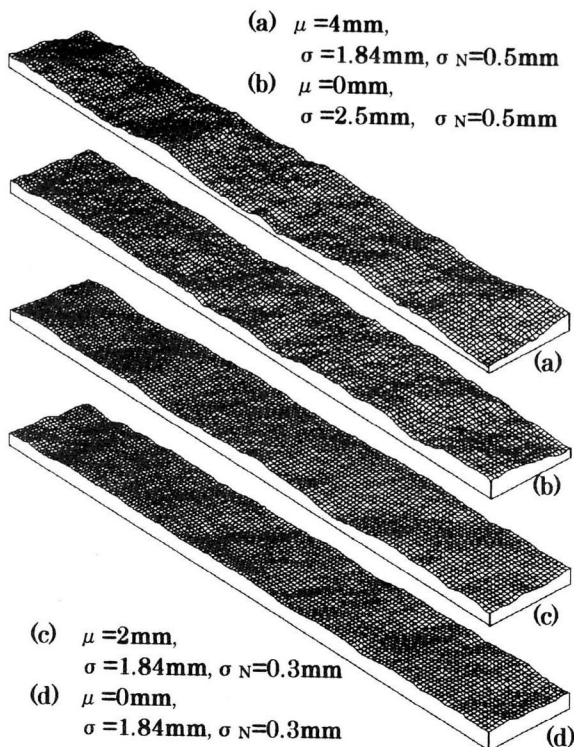


図-7 腐食形状シミュレーションの結果の例

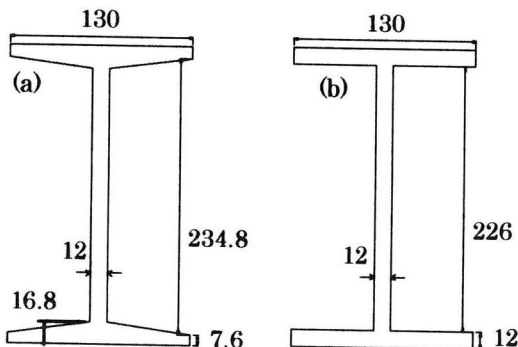


図-9 桁試験体の基本断面形状

の確率密度を比較することにより行う。満たしていれば、これを交点2の腐食深さとし、順列より削除する。満たさない場合には、順列2,3,4...と、条件を満たす深さを探し、それを交点2の腐食深さとし、それを順列より削除する。交点2が節点1に隣接していない場合には、節点3,4,5...と順次節点1に隣接する節点を探す。

- (b) (c)の作業を繰返し、すべての節点の腐食深さを決定する。なお、複数の隣接点を有する場合には、すべての隣接点に対して②の条件を満たしているかどうかを調べる。

2.5 腐食形状シミュレーションの結果

前節で示した方法を用いて実際に表面腐食形状を作

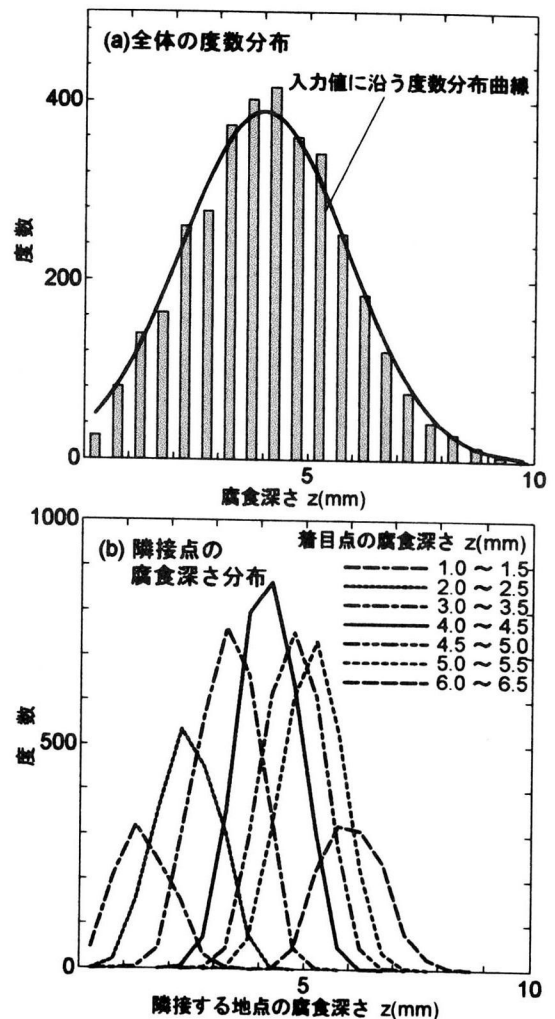


図-8 シミュレーションの精度

成した。その例を図-7(a)-(d)に示す。ここでは腐食深さの範囲を0~10mmに固定して、同図中に示す条件で腐食形状シミュレーションを行っている。

いずれのモデルも「全体的にみれば、滑らか形状となる。」という実際の腐食形状を再現している。

図-7(a)に示したモデルについて、その腐食深さの頻度分布と設定した腐食深さ分布、および腐食深さごとに示した隣接点の腐食深さ分布を図-8(a), (b)に示す。シミュレーションにより作成した腐食深さの分布、隣接点の腐食深さ分布とも、ほぼ設定した条件と一致している。

3. 穴吹橋腐食縦桁の曲げ耐力

前章では、穴吹橋の縦桁フランジの腐食形状について示したが、これらの縦桁については曲げ耐力試験も行われている^{5), 10)}。ここでは、その概要を示すとともに、これらの桁試験体の曲げ耐力解析を3次元弾塑性有限要素法を利用して行う。

表-3 鋼材の降伏応力

試験体	採取位置	降伏応力 (N/mm ²)
フランジ 1	下フランジ	199.1
フランジ 2	上に同じ	195.9
フランジ 3	上フランジ	191.2
フランジ 4	上に同じ	204.2
ウェブ 1	ウェブ	201.9
ウェブ 2	上に同じ	224.0
ウェブ 3	上に同じ	231.5
ウェブ 4	上に同じ	227.2
平均値		209.3

3.1 試験方法と結果¹⁰⁾

桁試験体の基本断面形状・寸法（腐食が生じる前の形状・寸法）を図-9(a)に示す。このように、フランジの厚さは一様ではなく、ウェブ近傍で厚く、端部で薄くなっている。この不等厚なフランジの板厚の平均値は約12mmであり、等厚とした場合には図-9(b)のようにモデル化できる。一部の桁試験体については、その上フランジ、下フランジおよびウェブから引張試験片を採取し、降伏応力と引張強度が調べられている。その結果を表-3に示す。降伏応力の平均値は209N/mm²であり、現在使われているSS400材よりもかなり低強度の鋼材が使用されていたものと考えられる。また、降伏応力に大きなばらつきが認められる。

曲げ試験は、荷重梁を介した2点荷重で行われている。縦桁の支間は2500mm、荷重梁の荷重点間距離は1000mmである。なお、試験は腐食の著しい上フランジ部を引張り側（下フランジ側）として行われている。荷重点と支点上に位置する縦桁ウェブには座屈防止のために垂直スチーフナが設けられている。

図-10に曲げ試験より得られた荷重と試験体支間中央のたわみの関係を示す。このような関係から曲げ耐力をどのように求めるかについては特に共通の定義はないため、ここではたわみが支間の1/100(25mm)となったときの曲げモーメントと定義する。このように定義した曲げ耐力は、試験体No.1で $8.04 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、No.2で $8.55 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、No.3で $9.52 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、No.4で $1.06 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}$ である。このように、曲げ耐力は腐食の著しいものほど低くなっている。

3.2 腐食桁の曲げ変形解析

図-10に示した荷重-たわみ関係を再現する目的で弾塑性有限要素解析を行った。曲げ耐力試験時に引張り側となるフランジの形状・寸法は、縦桁上フランジの腐食形状測定結果に基づいて設定した。解析対象は腐食桁4体（No.1～No.4）と腐食のない健全桁の5モデルである。健全桁モデルの形状・寸法は、図-9(a)に示したとおりである。

解析モデルの降伏応力は、実測結果に基づいてウェブで215.6N/mm²、上下フランジで196N/mm²とした。ヤング率は $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、応力-ひずみ関係はbi-linear

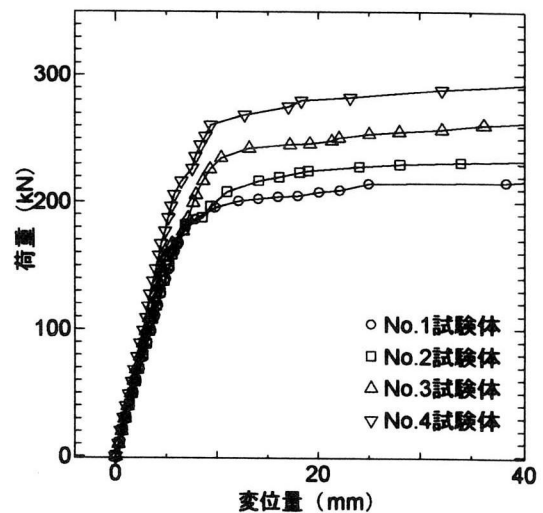


図-10 曲げ試験結果

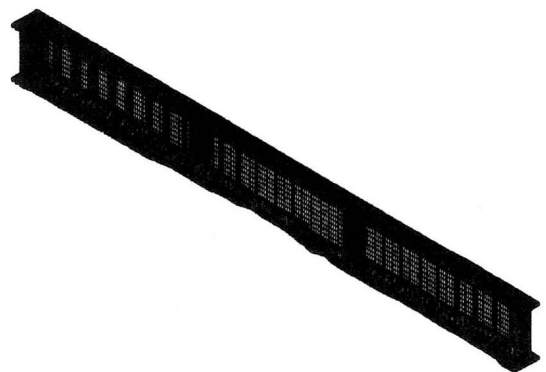


図-11 縦桁モデルの要素分割例

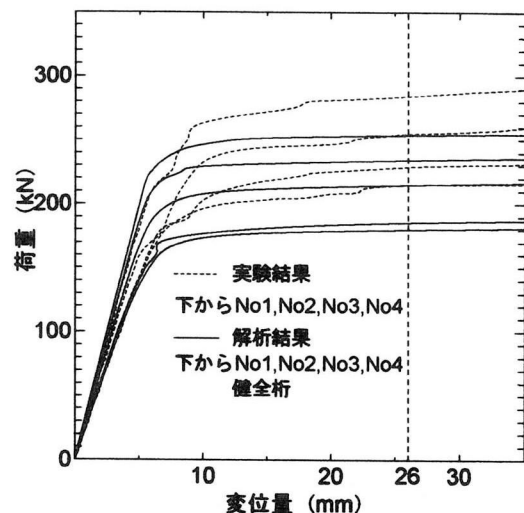


図-12 解析結果と実験結果の比較

とし、降伏後の応力-ひずみ関係の傾きは $4.66 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ とした。降伏の判定は von-Mises の降伏条件式に従った。なお、この解析には有限要素解析ソフト COSMOS/M を使用した。

各モデルは、8 節点固体要素を用いて要素分割を行った。腐食桁モデルの要素分割図の例を図-11に示す。要素寸法は、 $5 \times 5 \times 2 \text{ mm}$ (2mm は板厚方向) を基本とした。荷

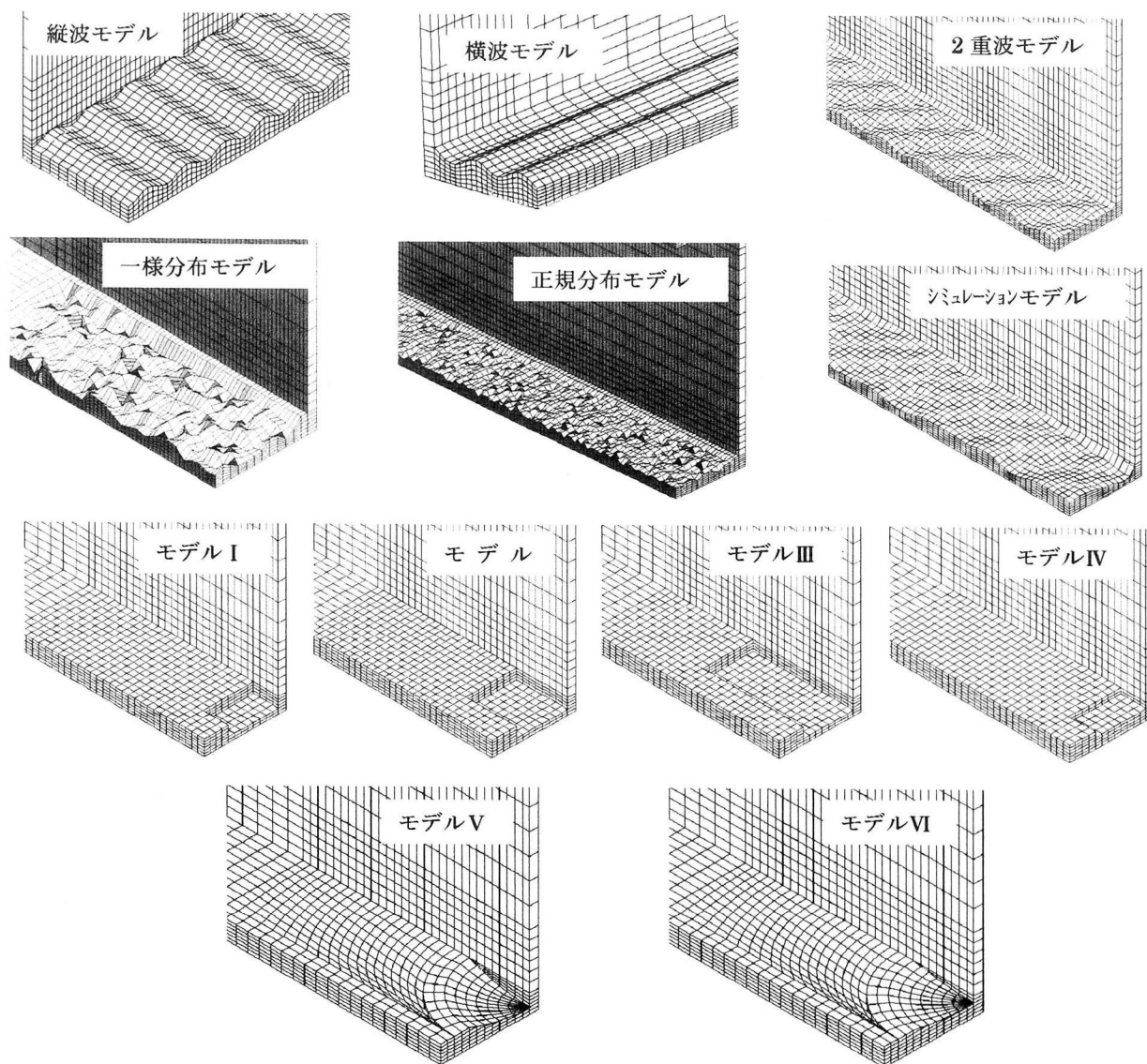


図-13 各腐食モデルの要素分割図の例

重は実験と同様に2点載荷とした。

図-12 に有限要素解析により求めた荷重と支間中央たわみの関係を、実験結果とともに示す。解析より得た荷重－たわみ関係は、実験結果と同様に変位が5mm程度までは直線であり、いずれの試験体においても解析より求めた直線の傾きは実験結果をよく再現している。また、腐食断面欠損率が大きくなるにしたがって耐荷力が低下する傾向もよく再現している。しかし、塑性域ではいずれの試験体とも解析より求めた荷重－たわみ関係は実験結果よりも下に位置している。この解析結果と実験結果の違いは、4つの試験体でほぼ同じとなっている。したがって、ここで得られた解析結果と実験結果の相違は各材料の降伏点の設定に問題があったためとも考えられる。

以上のように、解析結果と実験結果に差が生じたものの、解析より求めた弾性域の荷重－たわみ関係の傾きが実験結果とよく一致していること、また塑性域での荷重－変位関係についても解析結果は実験結果の傾向をよく表していることを加味すれば、ここで用いた弾塑性有限

要素法で腐食桁の曲げ耐力解析を行うことは妥当と考えられる。

4. 有限要素法を用いた腐食モデル桁の曲げ耐力の解析

本章では、2章で示した結果等に基づいて腐食形状を模擬したモデル桁の曲げ耐力解析を、3次元弾塑性有限要素法を利用して行い、全面腐食を有する桁の曲げ耐力評価法について検討する。さらに、同じ鋼Ⅰ桁の支間中央に局部腐食が生じた場合を対象として、全面腐食と同様の検討を行う。

4.1 解析モデル

解析対象は、図-9(b)に示した断面の鋼Ⅰ桁である。桁の長さは800mmとした。この桁の支間中央約500mmの範囲で下フランジ上面（ウェブに接する面）に全面腐食あるいは支間中央下フランジ上面に局部腐食の存在を仮定した。全面腐食の形状は、前章で示したシミュレーショ

ンモデルに加えて、縦波形モデル、横波形モデル、2重波形モデル、一様分布モデル、そして正規分布モデルの6種類とした。局部腐食としては、溝形モデルと楕円形モデルを仮定した。以上のモデルに加えて腐食のない桁(健全桁)も解析対象とした。各腐食モデルの形状を示す目的で、要素分割図の例を図-13に示す。

(1) 全面腐食モデル

縦波形モデルと横波形モデルは、腐食形状を正弦波でモデル化したものであり、最深部の腐食深さを1, 2, 4, 6, 8mm(最浅部は0)とし、その波長を深さの6倍(6, 12, 24, 36, 48mm)とした。ここでは、これらのモデルをそれぞれLS-①②③④⑤、TS-①②③④⑤と呼ぶ。2重波形モデルは、2重正弦波で腐食形状をモデル化したものであり、波長を40mmで一定とし、最深部の深さを2, 4, 6, 8mmとした。ここでは、これらのモデルをDS-①②③④と呼ぶ。

一様分布モデルは、一様乱数を用いて腐食を模擬したものである。腐食深さは、その平均が1, 2, 3, 4, 5mm(乱数の範囲0~2, 0~4, 0~6, 0~8, 0~10mm)となるように設定した。具体的には、5mm間隔で設定した節点の深さ方向の座標を、一様乱数を用いて与えることにより腐食形状を模擬している。ここでは、これらのモデルをUD-①②③④⑤と呼ぶ。

正規分布モデルは、正規乱数を用いて腐食を模擬したものである。一様乱数と同じように5mm間隔で設定した各節点での腐食深さを正規分布に基づく乱数により与えている。腐食形状は、図-14に示すように正規分布の標準偏差を1.8mmで固定して最頻値を0, 2, 4mmとすることにより腐食深さの程度を変えて腐食を模擬した。正規分布の中央値を0mmとして、標準偏差を1.0, 1.5, 2.5mmと変化した腐食モデルも作成した。ここでは、これらのモデルをND-①②③④⑤⑥と呼ぶ。

シミュレーションモデルは、2章で示した方法を用いて、腐食形状を模擬したものである。ここでは、正規分布の最頻値を0とし、標準偏差を1.0, 1.5, 1.8, 2.5mmとしたモデルと、標準偏差を1.8mmで一定として最頻値を0, 2, 4mmと変化させている。その際、隣接点の腐食深さの標準偏差は0.3mmとしている。これらのモデルをSM-①②③④⑤⑥と呼ぶ。同様に隣接点の腐食深さの標準偏差を0.5mmとしたモデルも作成した。これらのモデルをSM-⑦⑧⑨⑩⑪⑫と呼ぶ。

(2) 局部腐食モデル

溝形モデルは、以下の4形式からなる。モデルⅠでは、腐食深さを2, 4, 6, 8, 10mmとし、その幅と長さを深さの5倍とした。これらのモデルを、それぞれモデルⅠ-1, Ⅰ-2, Ⅰ-3, Ⅰ-4, Ⅰ-5と呼ぶ。モデルⅡでは溝の長さの幅を深さの10倍と5倍、モデルⅢとⅣではそれぞれ20倍・5倍と10倍・10倍としている。

楕円モデルは、1/4回転楕円体形で腐食を模擬したものである。このモデルは以下の2形式からなる。モデルⅤの腐食深さは、溝形腐食モデルと同様に2, 4, 6, 8, 10mmとしてその表面での幅を深さの5倍、長さを10倍

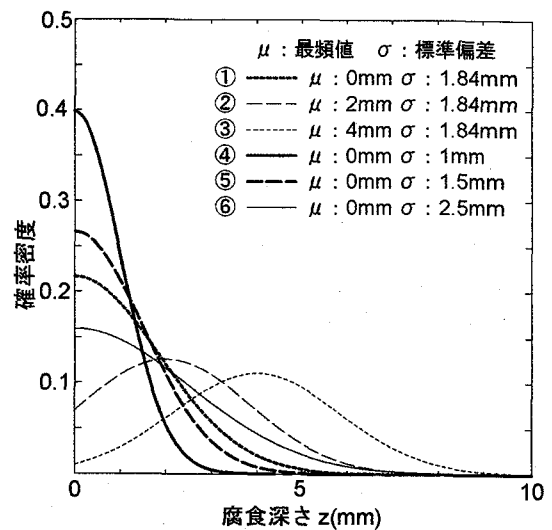


図-14 正規分布モデル

としている。これらをモデルV-1, V-2, V-3, V-4, V-5と呼ぶ。モデルVI-1は、腐食深さを2mmとしてその幅を深さの10倍、長さを20倍としている。モデルVI-2では、腐食深さを4mmとして、その表面での幅と長さの深さに対する比はモデルVI-1と同じである。

4.2 解析方法

鋼材はSS400を想定し、降伏応力を294N/mm²、ポアソン比を0.3、ヤング率を2.06×10⁵N/mm²とした。解析対象の対称性を考慮し、1/4モデルを用いて有限要素弾塑性応力解析を行った。要素寸法は、前章と同様に5x5x2mm(2mmは板厚方向)を基本とした。

モーメントはモデルの端面に全断面が降伏した際の応力分布と同じ矩形の分布荷重で与えた。拘束は、解析モデルを1/4モデル化したための拘束条件と支点からなる。支点は軸方向に可動としている。また、解析を安定させるために、上フランジ両端の上方100mmの地点にそれぞれ固定点を設けてフランジ両端と固定点をやわらかいバネで結んだ。このバネの断面積は1mm²、ヤング率は0.98N/mm²とした。その他の条件は、3.2節で示したものと同一である。

4.3 解析結果

各腐食モデルの解析で得られたモーメントMと桁中央のたわみδの関係の例を図-15(a), (b)に示す。曲げ耐力は、支間中央のたわみδが支間の1/100(8mm)に達した時のモーメントとした。

図-16(a)に全面腐食モデルの桁に対して得られた曲げ耐力比と最大腐食断面欠損率の関係を示す。曲げ耐力比とは、腐食を有する桁の曲げ耐力を腐食のない桁(健全桁)の曲げ耐力で無次元化したものである。最大腐食断面欠損率とは最も大きな腐食が生じたフランジ断面での腐食断面積を腐食のない下フランジ断面積で除したものである。当然のことではあるが、いずれの腐食モデルにおいても最大断面欠損率が大きくなるにしたがって曲げ

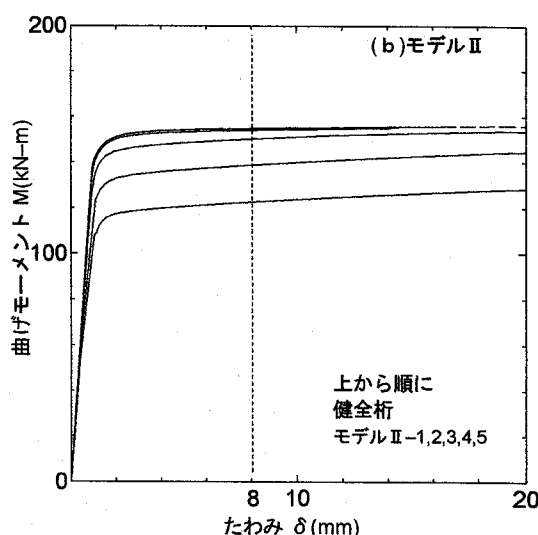
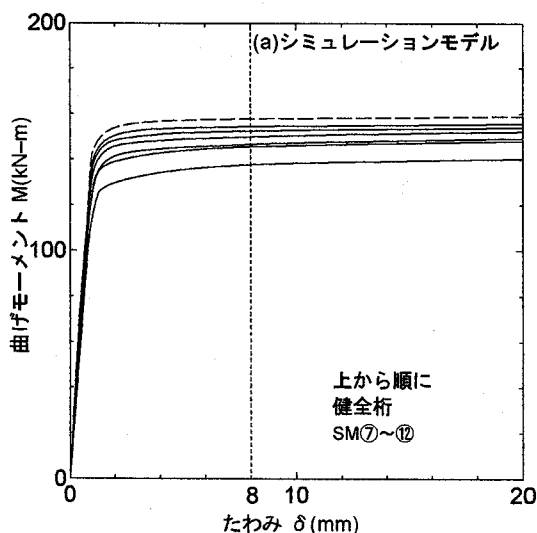


図-15 解析より求めた曲げモーメントとたわみの関係の例

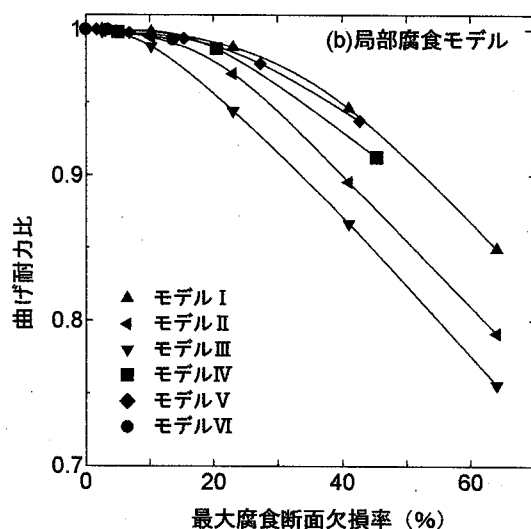
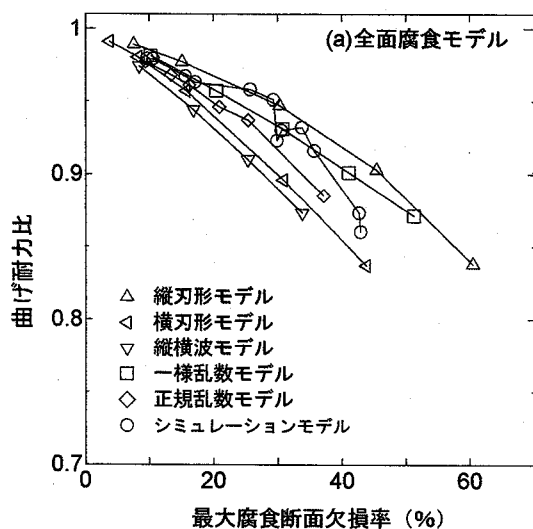


図-16 最大腐食断面欠損率で整理した曲げ耐力比

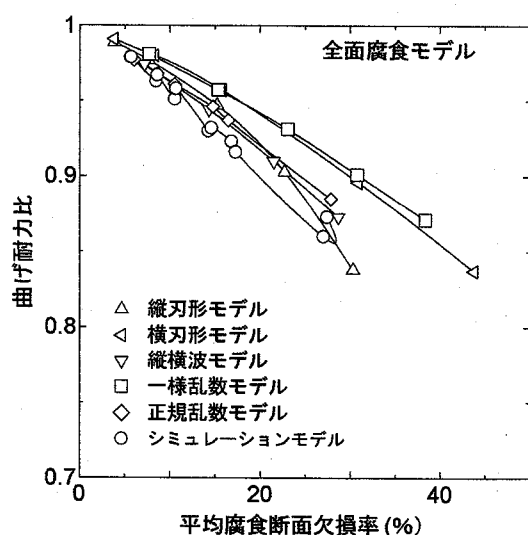


図-17 曲げ耐力比と平均腐食断面欠損率の関係

耐力比は小さくなっている。しかし、最大断面欠損率に伴う曲げ耐力の低下の様子は腐食モデルによって大きく

異なっている。例えば、横波形モデルと2重波形モデルでは最大腐食断面の増加にともなってほぼ直線的に曲げ耐力比は低下し、低下の程度も他の腐食モデルに比べて大きい。一方、縦波形モデルでは曲げ耐力の低下は小さく、低下の様子も上に凸な放物線状となっている。一様分布モデル、正規分布モデルとシミュレーションモデルの腐食を有する桁の曲げ耐力比は、横波形モデルと縦波形モデルの間となっている。

図-16(b)は、各局部腐食モデルを有する解析モデルで得られた曲げ耐力比と最大断面欠損率の関係を示したものである。同じ最大断面欠損率であれば、桁長手方向に腐食が大きい腐食モデルⅢで曲げ耐力比が小さく、表面での寸法に比べて腐食が深くなる腐食モデルⅠとⅤで曲げ耐力比が大きくなっている。

以上のように腐食形状により曲げ耐力比と最大腐食断面欠損率の関係は大きく異なり、最大腐食断面欠損率を、腐食を有する鋼桁の曲げ耐力を支配するパラメータとすることはできない。

図-17に全面腐食を模擬した各腐食モデル有する桁の

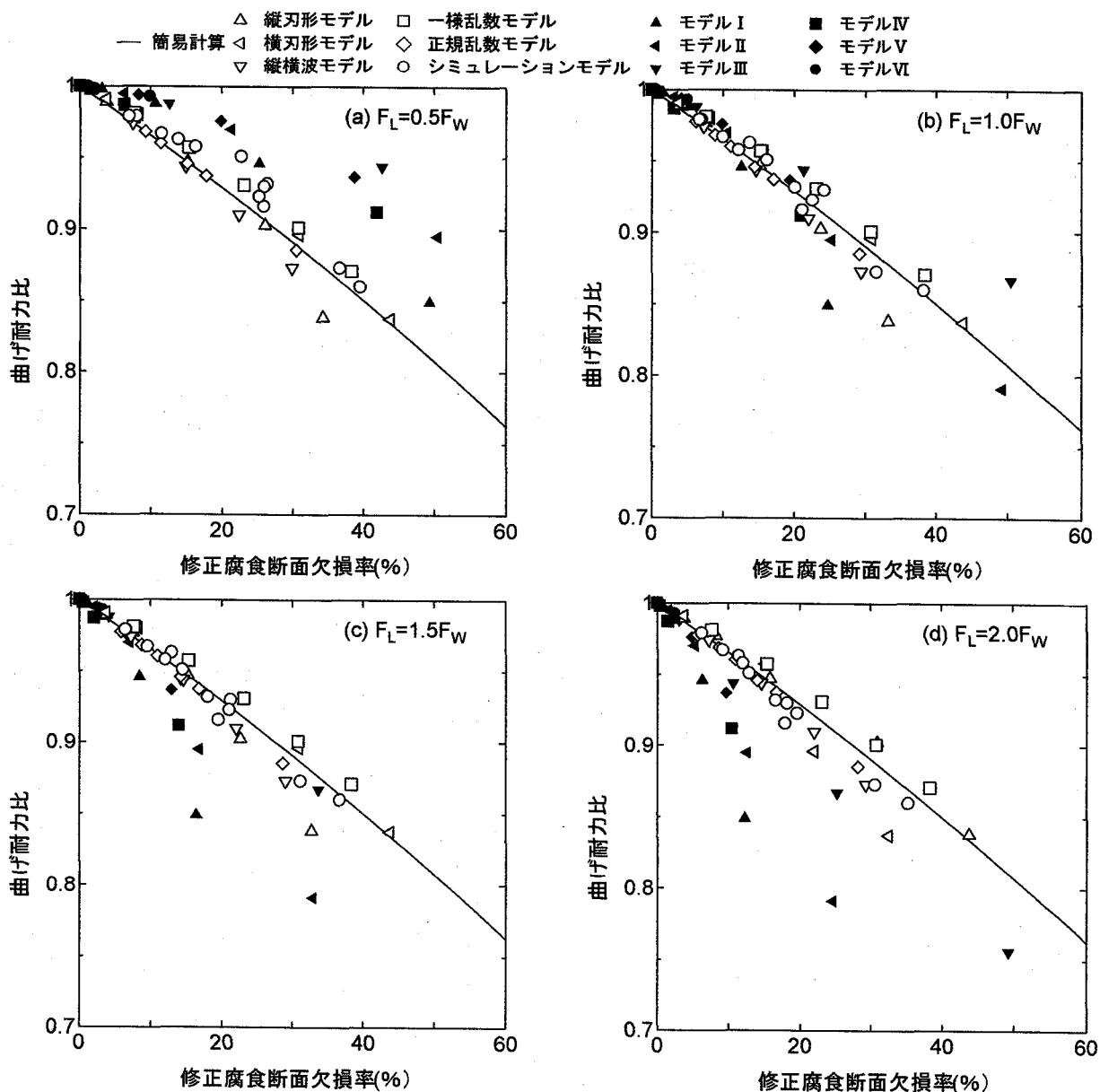


図-18 修正腐食断面欠損率で整理した曲げ耐力比

曲げ耐力比と平均腐食断面欠損率の関係を示す。平均腐食断面欠損率は、腐食の生じているすべての断面で平均的な断面欠損率であり、腐食を模擬した部分の体積欠損率に等しい。横波モデルの腐食は、すべて断面で同じ形状・大きさとなるため、平均腐食断面欠損率と最大腐食断面欠損率は同じとなる。最大腐食断面欠損率で整理した場合（図-16(a)）に比べ、腐食モデルによる曲げ耐力比の差は小さくなっているものの、やはりばらつきは大きい。また、同じ平均腐食断面欠損率であれば、横波モデルと一様分布モデルで曲げ耐力比が高く、縦波モデルとシミュレーションモデルで低くなっており、最大腐食断面欠損率で整理した場合の順序とは異なる。

4.4 修正腐食断面欠損率を用いた曲げ耐力の評価

図-16(a)、(b)と図-17に示したようにここで定義した曲げ耐力比を最大断面欠損率あるいは平均断面欠損率で

整理することはできなかった。曲げ耐力は、断面が大きな塑性変形を受けるときのモーメントと定義される。このような塑性変形は、桁全体に生じるのではなく、その一部に生じる。この領域（長さ）を特定できれば、そこでの平均腐食断面欠損率で曲げ耐力が評価できるものと考えられる。そこで、桁軸方向にフランジ幅 F_W の 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 倍の距離 (F_L) をとり、その領域での平均腐食断面欠損率を規則的に計算し、その中で最も大きい平均腐食断面欠損率で曲げ耐力を整理することを考えた。ここでは、この平均腐食断面欠損率を修正腐食断面欠損率と呼ぶ。

図-18(a)-(d)に曲げ耐力比と修正腐食断面欠損率の関係を示す。全面腐食については、 $F_L = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0F_W$ のいずれの場合も、腐食モデルによらず曲げ耐力比—修正腐食断面欠損率はほぼ一致している。このように、修正腐食断面欠損率で曲げ耐力比を整理することに

より、最大腐食断面欠損率や平均腐食断面欠損率においてみられた腐食モデルによる曲げ耐力比の差は認められない。また、この関係は、 F_L が0.50~2.0 F_w 程度の範囲であれば、腐食モデルによってもさほど変化していない。局部腐食についても腐食モデルによらず、曲げ耐力比—修正断面欠損率関係は、各 F_L で見ればほぼ一致している。しかし、全面腐食で得られた関係と比べると、 $F_L=0.5F_w$ では曲げ耐力比が大きく、 $F_L=1.5F_w$ あるいは2.0 F_w では小さくなっている。 $F_L=1.0F_w$ とすれば、全面腐食と局部腐食で曲げ耐力比—修正断面欠損率関係はほぼ一致している。したがって、桁全体が全塑性状態となるフランジの長さとしてはフランジ幅の1.0倍程度と考えられ、そこでの平均腐食断面欠損率を求めれば、全面腐食・局部腐食、また腐食形状によらず、桁の曲げ耐力を評価できると言えよう。

4.5 曲げ耐力の簡便な評価方法

ここでは曲げ耐力を表す指標として、単純な計算から求められる全塑性モーメント M_p を用いることを考えた。また、腐食したI形桁の全塑性モーメント M_p を計算するため、腐食による断面欠損分だけ下フランジの板厚を減じることを考えた。この桁の M_p は図-19に示す記号を用いると次式より求められる。

$$M_p = \sigma_y \left[\int_{y_2}^{y_1} w_l y \cdot dy + \int_0^{y_2} t_w y \cdot dy - \int_{-y_3}^0 t_w y \cdot dy - \int_{-y_4}^{-y_3} w_u y \cdot dy \right] \quad (1)$$

σ_y は降伏応力であり、ここでは294N/mm²である。(1)式から計算される健全桁モデルの曲げ耐力(全塑性モーメント)は $1.544 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$ であり、弾塑性解析から求めた曲げ耐力 $1.549 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$ とほぼ一致する。

図-18(a)-(d)に示す実線は、(1)式から求めた曲げ耐力比—断面欠損率関係である。この直線は、図-18(b)に示したデータをよく再現している。

5. まとめ

本研究では、実橋より撤去したいくつかの腐食鋼板の表面形状を測定し、腐食形状の特徴とその模擬方法について検討した。さらに、さまざまな表面腐食形状を有する鋼I桁の曲げ耐力について3次元弾塑性有限要素法を利用して検討した。限られた測定および解析ではあるが、ここで得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 腐食した鋼板の腐食深さは、正規分布にしたがう。
- (2) 測定間隔が2.5mm間隔以下ならば、ある着目点に隣接する地点の腐食深さは、着目点の腐食深さを最頻値とする正規分布にしたがう。
- (3) (1)、(2)の結果を利用して腐食形状を再現する方法を示した。
- (4) 下フランジに全面腐食を有する鋼I桁の曲げ耐力は、

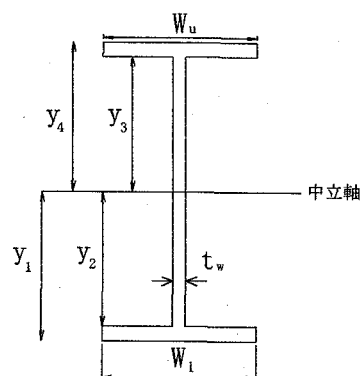


図-19 全塑性モーメントを計算するための断面緒元

桁軸方向長さをフランジ幅と同じとした領域での体積欠損率の最大値(修正腐食断面欠損率)で整理できる。

- (5) 下フランジに全面腐食を有する鋼I桁の曲げ耐力は、修正断面欠損率だけ下フランジの厚さを一様に減じた桁の全塑性モーメントで評価できる。

参考文献

- 1) 土木学会: 鋼橋における劣化現象と損傷の評価, 丸善, 1996.
- 2) 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, 土木学会構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 1097~1102, 1992.
- 3) 村中 昭典, 皆田 理, 藤井 堅: 腐食鋼板の表面性状と残存耐力, 土木学会構造工学論文集, No. 44A, pp. 1063~1071, 1998.
- 4) 名取 暢, 西川 和廣, 村越 潤, 大野 崇: 腐食部材の添接板補強に関する研究, 土木学会論文集, No. 682, pp. 207~223, 2001.
- 5) 名取 暢, 西川 和廣, 村越 潤, 大野 崇: 鋼橋の腐食事例調査とその分析, 土木学会論文集, No. 668, pp. 299~311, 2001.
- 6) 長屋 五郎, 酒井 吉永, 山田 聡, 佐野 公彦: 腐食した鋼材の腐食深さと疲労強度(鋼橋を対象), トピー鉄構技報, No. 17, 2001.
- 7) 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, pp. 109~116, 2001.
- 8) 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, 土木学会構造工学論文集, Vol. 48A, pp. 1031~1038, 2002.
- 9) 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, JSSC レポート, No. 51, 2002.
- 10) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室: 橋梁部材の腐食に対する健全度評価手法に関する共同研究報告書「腐食橋梁部材の対荷力実験」1996.

(2002年9月13日受付)