

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

Applicability of Spatial Auto-Correlation Model for Corroded Surface Modeling in Corroded Steel Plate

藤井 堅*・海田 辰将**・平井 勝志***・奥村 誠*

Katashi Fujii・Tatsumasa Kaita・Katsushi Hirai・Makoto Okumura

* 工博 広島大学大学院工学研究科助教授 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

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

*** 工修 岡山県高梁地方振興局 (〒716-8585 岡山県高梁市落合町近似 286-1)

ABSTRACT: Corrosion damages are becoming more and more important problem for steel bridge maintenance, recently. Since irregularity of corroded surface is one of the most important factors to predict remained strength, we made surface irregularity of corroded steel plates to simulate their ultimate strengths numerically. The spatial auto-correlation model (SAC-model) is applied to make the generally corroded irregularity, where the corrosion damage spreads over the plate surface with depth and width. Then, the applicability of SAC-model is verified by comparing with analytical and experimental results in view point of the buckling strength of corroded steel strips. Results show that irregularities made by SAC-model are useful to estimate the remained buckling strength.

Keywords : *Spatial auto-correlation, Corroded steel plate, Remained strength, Random numbers of Poisson distribution*

キーワード：空間的自己相関，腐食鋼板，残存強度，ポアソン分布乱数

1. はじめに

橋梁における腐食損傷の評価は、ほとんどが技術者の目視的判断によって行われており、力学的根拠に基づく強度評価はあまりなされていない。実際の現場では「橋梁の腐食状態を測定した結果から、残存強度をどのように推定すればよいのか」が強く要求されているにもかかわらず、腐食した構造物あるいは部材の残存強度を正確に把握できないのが現状といえる。したがって、腐食損傷を受けた橋梁あるいはその部材の強度を、経済的かつ正確に判断できる評価指標の確立が急務である。これにより、評価指標を精度よく求めるための計測技術の開発および推定された残存強度に基づく補修・補強の要否や架け替えなどの判断と対処に対して精度の改善、合理性・経済性の向上が期待できる。

通常、腐食鋼材の残存耐力を推定するには、たとえ

ば有効板厚¹⁾のように、腐食減肉後の板厚を基準とすることが多い。腐食鋼材の残存耐力評価のための支配的統計指標を得るためには、実際に腐食した鋼材について多数の実験を行って、その結果から統計的に求めるのがより正確である。しかし、腐食した鋼材の収集自体容易ではなく、また、仮に腐食鋼材が得られたとしても板厚測定などに多大な時間を要するので、統計的に十分な数を実験だけで得ることは難しいであろう。したがって、一方で数値解析シミュレーションによる検討が必要となるが、このとき、モデル化された腐食表面形状は実際のそれとできるだけ近いものを適用することが、精度の高い評価を行うためには不可欠である。

フランジ全体の腐食減肉後における部材強度に及ぼす影響や局部腐食による強度低下を数値解析的に解明しようとした試みがある²⁾。これらは3次元立体要素を用いて空間的に一様の腐食減肉を仮定し、局部腐食に

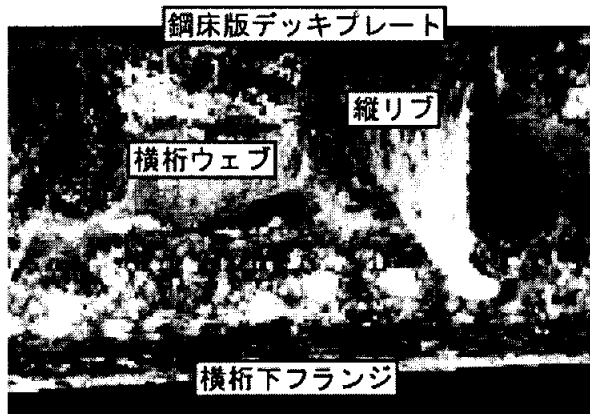


Photo.1 フェリー渡橋の腐食状況

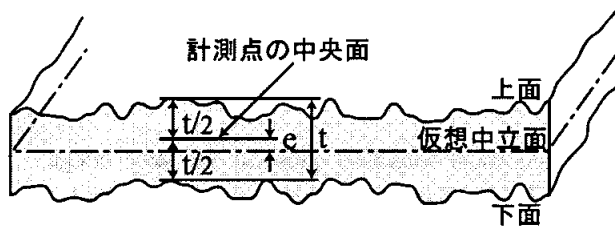


Fig.1 仮想中立面および偏心量

については局部的に要素を取り除くことによって腐食状態を表わしている。しかし、腐食は表面のみならず深さ方向へも時間的、空間的にばらつきを持って進展する現象であるため、腐食による部材表面の凹凸形状を考慮した解析が要求されよう。また、腐食表面形状を考慮した解析では、一様乱数を腐食量とした部材の残存強度解析や腐食鋼板の表面形状を二重 sin 級数や正規分布乱数を用いて表現した残存強度解析³⁾などがあるが、腐食領域の広がりや凹凸形状を実際の腐食状態に近い形で表現するという意味において十分とはいえない。

奥村・藤井⁴⁾らは、地域経済学の分野で発展してきた空間的自己相関モデルの考え方を適用して、腐食深の空間的自己相関パターンを考慮した腐食表面モデルを提案し、長年供用された鋼構造物から採取した腐食鋼板の試験片を対象として、提案したモデルは統計的な説明力がより高いことを示した。

本研究の目的は、空間的自己相関モデルにより作成した腐食表面形状を有する鋼板の座屈強度評価という面からモデルの適用性を検討することである。以下では、まず15年間供用されたフェリー渡橋から切り出した腐食鋼材を用いた圧縮強度試験を示し、次にその結果を用いて本研究で採用したモデルの適用性について検討する。

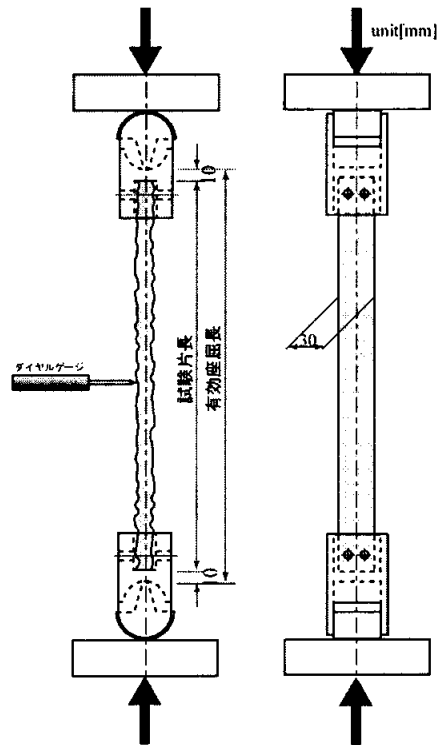
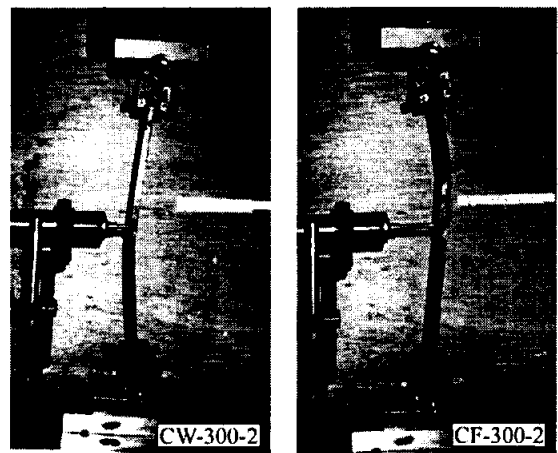


Fig.2 圧縮強度試験装置概略

Table.1 材料特性

	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν	降伏応力 σ_y (MPa)
リブ	206.6	0.287	273.6
ウェブ	202.1	0.274	277.5
フランジ	196.5	0.275	259.7



(a) 全体座屈 (b) 局部座屈

Photo.2 試験片の崩壊性状

2. 腐食鋼材の圧縮強度試験

(1) 試験片

著しく腐食したために撤去されたフェリー渡橋の横桁フランジ、ウェブおよび床版の縦リブ部分から短冊状の試験片を切り出して圧縮強度試験を行った。

Table.2 圧縮強度試験結果

試験片名 Unit	平均腐食量 (mm)	標準偏差 (mm)	最大腐食量 (mm)	平均偏心率 (mm)	最小腐食量 (mm)	P (kN)	Pa (kN)	Psa (kN)	Pra (kN)
CR-450-2	1.03	0.72	3.36	0.45	0.11	15.58	13.03	14.78	17.77
* CR-450-3	1.14	0.42	2.42	0.05	0.19	12.41	14.31	15.85	19.77
* CR-350-1	1.66	0.55	3.43	0.00	0.53	20.96	19.58	22.18	28.17
* CR-350-2	1.31	0.52	2.85	0.17	0.20	20.61	21.16	23.94	27.90
CR-350-3	1.26	0.79	3.41	0.11	0.00	19.58	20.65	22.45	25.96
CR-250-1	2.45	0.69	4.14	0.15	1.11	19.49	24.02	30.43	36.94
CR-250-2	2.73	0.81	5.11	0.24	1.33	21.61	21.12	27.76	34.55
* CR-250-3	0.38	0.14	0.88	0.15	0.17	44.89	50.15	51.16	51.27
CR-250-4	2.13	0.76	4.61	0.11	0.88	19.80	29.59	34.47	41.64
CR-150-1	3.40	0.80	5.18	-0.12	1.49	24.82	29.88	34.41	38.15
* CR-150-2	0.45	0.19	1.15	-0.03	0.18	61.84	69.92	71.30	70.68
CR-150-3	1.50	0.67	3.93	0.31	0.61	49.79	41.99	46.85	47.68
* CW-450-1	1.27	0.58	3.09	0.17	0.21	17.79	11.77	13.60	18.37
* CW-450-2	1.37	0.54	3.00	0.57	0.39	17.48	11.46	13.21	17.04
* CW-350-1	1.37	0.54	3.19	0.37	0.26	18.55	16.69	18.44	23.33
* CW-350-2	0.29	0.21	1.35	-0.15	0.05	24.05	23.43	23.26	23.53
CR-350-3	1.64	0.63	3.50	-0.04	0.39	10.06	15.89	17.80	23.51
* CW-200-1	0.34	0.10	0.67	-0.05	0.20	49.69	62.42	62.77	62.89
* CW-200-2	0.30	0.06	0.52	0.03	0.06	53.94	62.15	62.77	62.89
* CW-200-3	0.55	0.17	1.16	0.17	0.30	53.86	59.93	55.25	55.52
* CW-200-4	0.51	0.37	1.66	0.08	0.19	62.95	54.37	55.25	55.52
* CW-200-5	0.53	0.27	1.58	0.01	0.13	37.95	55.05	55.25	55.52
* CW-100-1	0.27	0.01	0.31	-0.01	0.26	75.50	72.60	72.37	72.32
* CW-100-2	0.27	0.01	0.30	-0.07	0.25	80.96	72.75	72.37	72.32
* CW-100-3	0.19	0.04	0.40	-0.01	0.14	77.01	72.85	73.15	72.65
CF-450-1	2.76	0.66	5.14	0.38	1.31	21.23	19.60	29.59	39.54
* CF-450-2	3.66	0.74	5.97	0.34	1.94	14.00	16.00	25.36	47.56
* CF-300-1	2.69	0.67	5.49	0.62	1.44	36.09	44.15	49.04	54.94
CF-300-2	3.54	0.72	5.73	0.40	1.77	19.80	34.57	44.49	50.82
CF-300-3	3.28	0.50	4.71	-0.17	2.02	20.72	34.47	43.50	48.60
* CF-300-4	2.92	0.51	4.29	-0.31	1.62	32.71	38.03	48.50	55.08
CF-150-1	2.38	0.78	5.19	0.76	1.30	54.04	71.05	70.66	71.02
CF-150-2	3.81	0.83	6.37	0.05	2.20	32.29	54.02	50.98	54.64

(*)印は全体座屈した試験片を示す。

P:実験値(最高荷重), Pa:実測値モデル, Psa:空間的自己相関モデル, Pra:ポアソン乱数モデル

Photo.1 に試験片を切り出す前のフェリー渡橋の腐食状況を示す。この部分は鋼床版であるが、横桁や縦リブは満潮時に海水に浸るため、腐食損傷が特に激しい。腐食前の板厚は公称値で縦リブ 9.5mm, 横桁ウェブ 9mm, 横桁フランジ 12mm であった。以下ではこれらを単にリブ, ウェブ, フランジと称することとする。

圧縮強度試験に先立って、切り出した鋼材の両面を平滑仕上げして作成した JIS5 号試験片 7 本(リブ 3, ウェブ 3, フランジ 1) を用いて引張試験を行った。Table.1 に引張試験から得た腐食鋼材の材料特性を示す。

試験片は全て幅 30mm に統一し、試験片長を 100~450mm に変えたものを 33 体作成した。切り出した試験片は、塗膜除去剤およびワイヤーブラシを用いて表面の塗膜や浮き錆を除去し、減肉による純粋な板厚を測定した。このとき、板厚は試験片の片面に 5mm 間隔の格子を設け、格子点の板厚を板厚計測器を用いて測定した。この板厚計測器は板厚測定用にダイヤルゲージを用いて制作したもので、各格子点での板厚を直接

読み取ることができる。

偏心量については、実構造物での荷重作用面を基準とすべきであるが、これが不明であるため Fig.1 に示すように試験片の断面内に仮想中立面を設けて基準とし、この仮想中立面から各格子点における板厚の中央面までの距離を本研究では偏心量と定義した。したがって、本研究における偏心量は、片面腐食等で取り扱うような実際の偏心量とは意味が異なることに留意されたい。

(2) 圧縮強度試験装置

試験片を取り付けた状態の圧縮試験装置の概略を Fig.2 に、崩壊性状の一例を Photo.2 に示す。試験片は前節で述べた仮想中立面と圧縮力の作用線が一致するように注意して試験装置に取り付けた。また、試験片の両端におけるピン支承はヒンジ部の拘束を防ぐため、ナイフエッジ型のものを採用した。

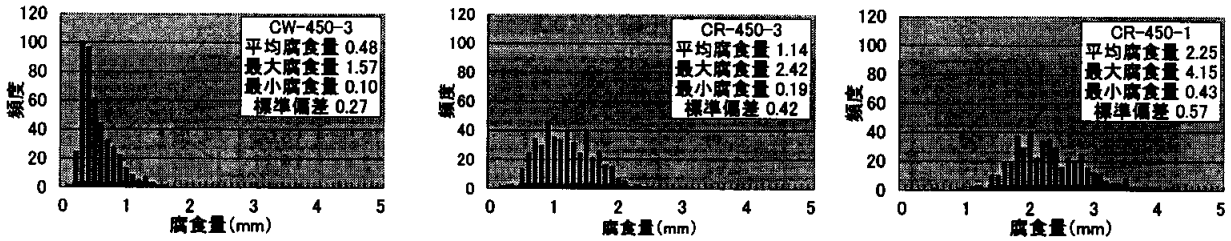
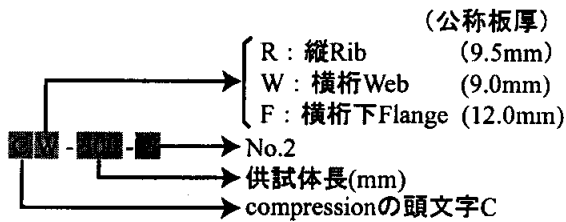


Fig.3 腐食量ヒストグラムの推移図
(CW-450-3→CR-450-3→CR-450-1)

(3) 試験結果

板厚測定および圧縮強度試験の結果を Table.2 に示す。表中、試験片名は以下のように定めた。



また、試験後において座屈モードが全体座屈であったものには、表中の試験片名の前に(*)を付している。

ここで座屈モードは目視にて判断し、Photo.2(a)に示すように、全体に変形したものを「全体座屈」とし、同写真(b)のように局部的に変形した座屈モードを「局部座屈」とした。

なお、今回の試験では仮想中立面をほぼ板厚の中央に設定したため、Table.2 に示すように平均偏心量は小さく、またその影響はほとんど無かった。

3. 空間的自己相関を考慮した表面形状の作成

(1) 腐食鋼材の腐食量分布特性

全 33 体の試験片のうち、平均腐食量が CW-450-3→CR-450-3→CR-450-1 の順番で大きくなる 3 体の試験片における腐食量ヒストグラムを Fig.3 に示す。

Fig.3 に示すヒストグラムおよび他の試験片の腐食量ヒストグラムから、その分布形状には次のような特徴が確認された。

- ① 平均腐食量が約 0.5mm 以下の場合、腐食量 0mm 付近で最大頻度となり最大腐食量値まで急勾配の分布形状となる。また、分布範囲も非常に狭い。
- ② 平均腐食量が約 0.5mm 以上の場合、平均腐食量付近で最大頻度となり正規分布のような形状となる。
- ③ 平均腐食量が増加するにつれて、その腐食量ヒストグラムは、より最頻値が小さく、裾野の広い分布形状となる。

本研究ではこのように腐食の進行によって分布形状が大きく変わる鋼板表面の腐食現象を空間的自己相関の概念を導入して腐食領域の広がりとして表現することを試みる。

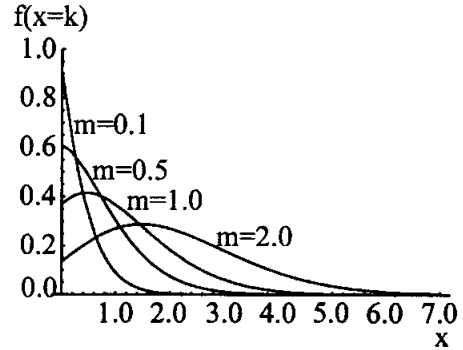


Fig.4 ポアソン分布の確率分布

(2) 空間的自己相関による腐食現象のモデル化

奥村、藤井⁴⁾らは腐食鋼材の表面形状データに、空間的自己相関モデルを当てはめ、統計的により説明力の高い表面形状モデルが作成できることを示した。

空間的自己相関モデルでは、腐食現象を

- ① 雨滴などの外的要因に起因する腐食量(以下独立腐食深と呼ぶ)が発生し、
- ② ある点の腐食量はその周囲の点の独立腐食深による影響を受け、その影響度は 2 点間の距離に依存する。

という 2 段階に分けて表現する。このように、腐食の進展が、深さのみならず空間的な広がりをもって起こるといふとらえ方にこのモデルの特徴がある。上記の概念を示せば、式(1)のようになる。

$$Z_i = \sum_{j \in \Omega} (e^{-\beta d_{ij}}) V_j, \quad (1)$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & e^{-\beta d_{12}} & \dots & e^{-\beta d_{1n}} \\ e^{-\beta d_{21}} & 1 & \dots & e^{-\beta d_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-\beta d_{n1}} & e^{-\beta d_{n2}} & \dots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$$

ここに、

Z_i : i 番目の計測点の腐食深

d_{ij} : i, j 間の距離

V_j : j 番目の計測点の独立腐食深

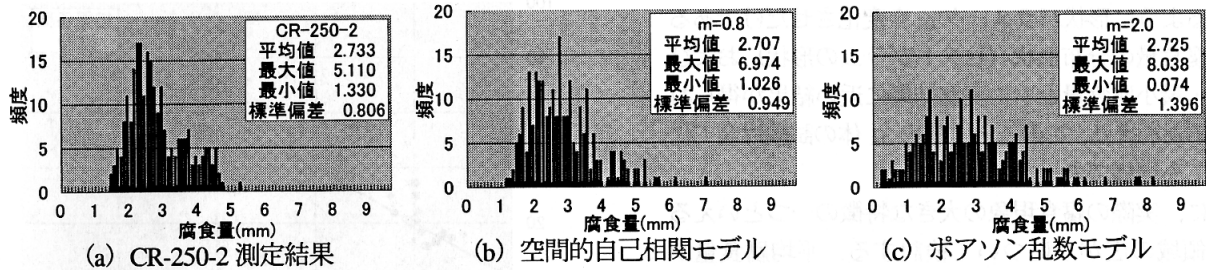


Fig.5 腐食量ヒストグラム想定結果 (CR-250-2)

β : 距離減衰の強さを表すパラメータ
 Ω : 空間的な影響を及ぼす領域? (ここでは 50mm とした)

(3) 減衰パラメータ

減衰パラメータ β は奥村, 藤井⁴⁾らが算出したものを参考に $\beta=0.4$ とし, 腐食鋼材の表面形状の推定を行う。

(4) 独立腐食深の想定

鋼板表面の腐食量は Fig.3 に示したように, 腐食状況に応じて分布形状が大きく変化する。本研究では独立腐食深を想定する際, 腐食の程度を容易に表現できるという理由でポアソン分布型乱数列を採用した。ポアソン分布型乱数列とは, 一様乱数列をポアソン分布に変換したものである。なおポアソン分布に従う確率分布は,

$$p(X = k) = e^{-m} \frac{m^k}{k!} \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

と示される。上式においてポアソン分布の平均値 m が決まれば, 確率変数 X が $0, 1, 2, \dots$ である確率は決定され, 例えば $m=0.1, 0.5, 1, 2$ について示すと Fig.4 のようになる。図に示すように m の値により腐食の程度が表現でき, m が大きいほど腐食が進行していることになる。

ポアソン乱数列の作成法については, 区間 $[0, 1]$ 上の一様乱数列を $u_1, u_2, u_3, \dots, u_i, \dots$ とすると式(2)よりまず u_1 について

$$\sum_{k=0}^{x_1-1} e^{-m} \frac{m^k}{k!} \leq u_1 < \sum_{k=0}^{x_1} e^{-m} \frac{m^k}{k!}$$

を満足する x_1 を求める。この操作を繰り返して得られる数列 $x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, \dots$ がポアソン乱数列となる。また, 一様乱数列は乗算合同法により作成した。

(5) 腐食鋼材の表面形状想定結果と考察

腐食量を想定する際, 試験片の平均腐食量の実測値と, 式(1)から得られた想定値の平均値ができるだけ一致するように形状パラメータ m を試算して腐食表面形状を求めた。

ここでは, 一例として平均腐食量が 2.733mm の CR-250-2 を取り上げて説明するが, 本モデルとの比較として, 独立腐食深に空間的自己相関を考慮しないで

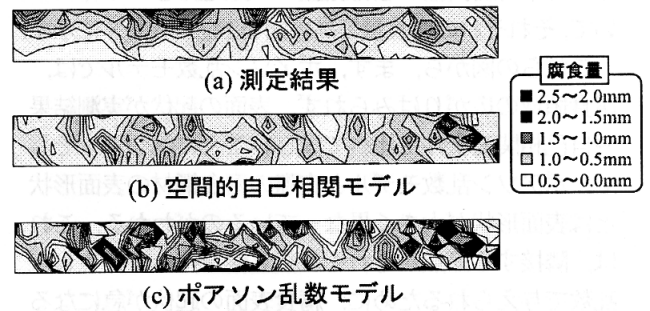


Fig.6 腐食量等高線図 (CW-200-5)

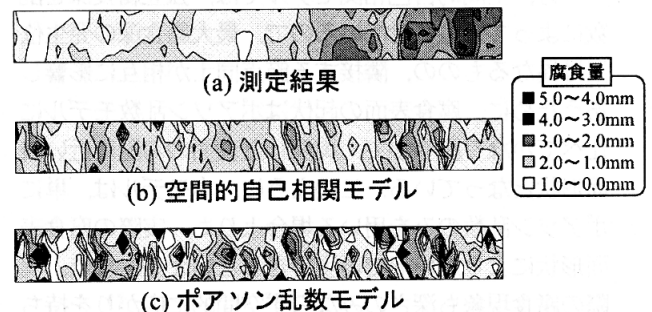


Fig.7 腐食量等高線図 (CR-350-3)

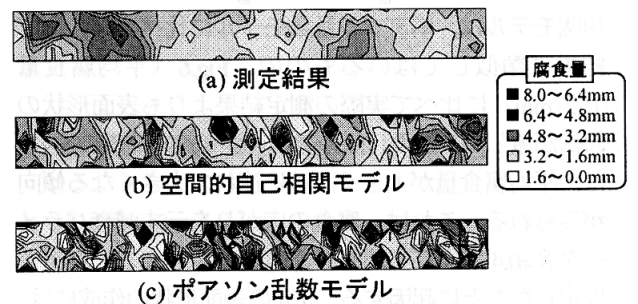


Fig.8 腐食量等高線図 (CR-250-2)

ポアソン乱数列のみで腐食量を求めた結果(ここではポアソン乱数モデルと呼ぶ)もあわせて示す。

Fig.5 は, 試験片 CR-250-2 の(a)実測結果, (b)空間的自己相関モデル, (c)ポアソン乱数モデルの腐食量ヒストグラムを示したものである。図から, 平均腐食量はどれも 2.7mm 程度であるが, ポアソン乱数モデル(図(c))では, 腐食量の分布はかなり広い範囲に広がっており, 実際のヒストグラム(図(a))と比べて大きくかけ離れた分布となっているのがわかる。一方, 空間的自己相関モデルでは, 平均腐食量のみを実測値に一致

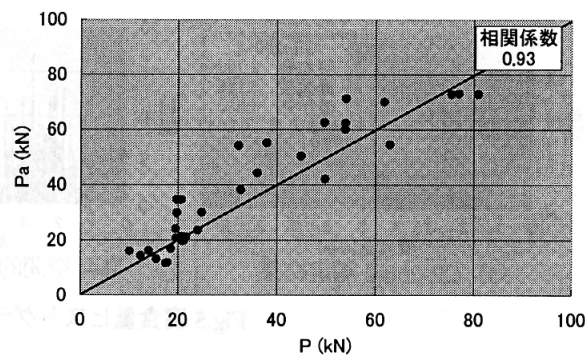
させるように形状パラメータ m を変化させただけであるが、腐食量の分布形状（ヒストグラムの形状）および最大・最小腐食量ともに実測結果に近い結果が得られているといえる。このことは他の31体の試験片全てに関しても同様であった。

次に、実際の腐食現象の大きな特徴の一つといえる腐食領域の広がりについて検討する。平均腐食量が0.527mmのCW-200-5、平均腐食量1.261mmのCR-350-3、そして平均腐食量が2.733mmのCR-250-2の3体について、それぞれの腐食量等高線を Fig.6~Fig.8 に示す。

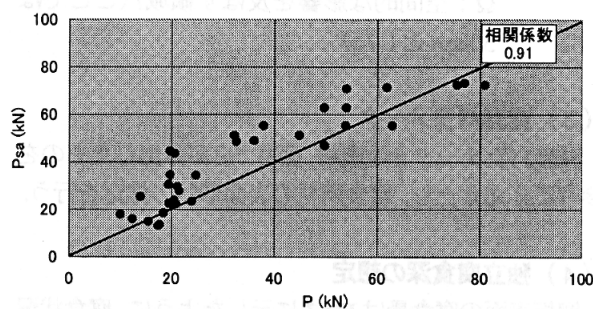
これらの図から、まず、ポアソン乱数モデルでは、腐食領域の広がりにはみられず、表面の起伏が実測結果や自己相関モデルに比べて激しいことに気づく。そして、ポアソン乱数モデルと実際の腐食鋼材の表面形状とは表面形状が大きく異なっているのがわかる。これは、隣接する節点がそれぞれ独立性を持って発生した乱数で与えられるために、腐食表面の起伏が急になることに因る。

一方、空間的自己相関モデルでは、独立腐食深を乱数によって発生させているので、最大腐食深の発生位置は異なるものの、隣接する節点同士が相互に影響しあうために、腐食表面の起伏はポアソン乱数モデルに比べてかなり緩やかで、実測した表面の勾配に近い表面形状となっている。このように、本モデルは、単にポアソン乱数のみを用いる場合よりも、実際の腐食表面形状により近い形で再現できるといえる。また、実際の腐食現象も深さのみならず空間的に広がりを持ちながら進展していくと考えられる。

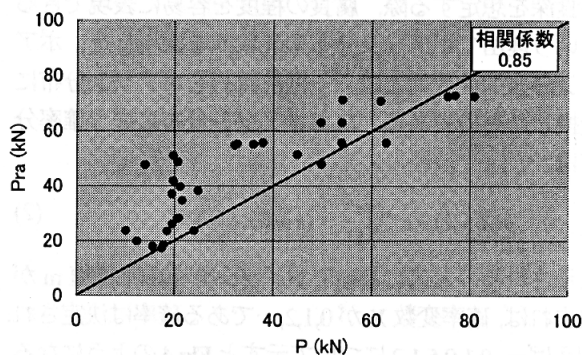
しかしながら、Fig.7 および Fig.8 では、空間的自己相関モデルは、ポアソン乱数モデルに比べ実際の測定結果に類似してはいるものの、Fig.6（平均腐食量0.527mm）に比べて実際の測定結果よりも表面形状の起伏が激しい。この起伏の違い（等高線の間隔の違い）は、平均腐食量が大きくなるに連れて大きくなる傾向がみられる。これは、腐食の広がりを示す減衰パラメータ $\beta=0.4$ および空間的影響範囲 $\Omega=50\text{mm}$ と一定値を仮定したことに起因する。今回の表面形状の作成には、腐食現象を①独立的な外的要因のみに起因する腐食量の発生、②ある点の腐食量はその周囲の腐食量の影響を受ける、という2つの段階に分けて考え、時間的因子を考慮しないで現時点での独立腐食深を与えている。しかし、実際の腐食は時間とともに進行する現象であり、実際には上記2段階の現象を時空間的にとらえるべき現象と考えられる。また、実際には、腐食を発生させる因子（外的作用）も鋼板表面全体にわたって必ずしも一様ではないことも考えられる。これらについては、今後なお改善すべき余地が残されている。



(a) 実測値モデル Pa



(b) 空間的自己相関モデル Psa



(c) ポアソン乱数モデル Pra

Fig.9 各推定法と実験値の相関

4. 残存圧縮耐力からみた空間的自己相関モデルの適用性

空間的自己相関モデルの適用性を残存座屈耐荷力の面から検討するために、腐食鋼板の2次元弾塑性解析を行った。解析は、4節点アイソパラメトリックシェル要素⁵⁾を用い、座標更新法および増分理論を用いた複合非線形有限要素解析である⁶⁾。応力-ひずみ関係は完全弾塑性とし、降伏応力などの材料特性はTable.1に示した結果を用いた。境界条件は、試験片の向かい合う短辺（両端）を単純支持、長辺は自由とした。載荷は、一つの短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、解析では、①板厚の実測値をそのまま反映させた解析（実測値モデルと呼び Pa で表す）、②空間的自己相関モデルによる表面形状から得られた板厚を

用いた解析(Psa),そして③ポアソン乱数モデルによる表面形状から得られた板厚を適用した解析(Pra),の3種類のモデルについて行った。

全33体の試験結果に対応して各モデルを用いて圧縮耐荷力解析を行い,得られた最高荷重(残存圧縮強度)をTable.2に示す。また,解析モデルの圧縮強度解析結果と実験結果を比較して, Fig.9に示す。Fig.9から,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用いた解析結果は,相関係数0.91と実験結果とよく対応しており,本モデルが腐食表面形状作成において十分に適用可能と判断できる。

一方,ポアソン乱数モデルそのものを用いた結果では,相関係数は0.85で空間的自己相関モデルよりも低く,平均板厚を一致させても十分な精度で強度を評価するのは難しいことがわかる。

また, Fig.9(a)に示すように,実測板厚を用いた解析は実験結果と最も良い相関係数が得られてはいるもののいくつかばらついているのがわかる。これは,板要素を用いているために応力集中などの影響を十分に考慮できていないことなどに起因すると考えられるが,腐食した板の残存圧縮強度評価においては板要素を適用して十分と考えられる。

Fig.10に,実測板厚を用いた残存圧縮耐荷力解析結果と空間的自己相関モデルにおける解析結果の相関を示す。図から相関係数は0.99で,両者はよく一致していることがわかる。空間的自己相関モデルでは,乱数を用いて腐食表面を作成しているため, Fig.6~Fig.8に示すように,最大腐食深の位置などは実際とは大きく異なっている。しかし, Fig.10に示すように,実測モデルと空間的自己相関モデルによる両者の残存耐荷力が一致するのは,腐食の空間的な広がりを再現できていることに起因するものと判断される。すなわち,空間的自己相関モデルによって作成した表面形状を用いた圧縮残存耐力解析結果は,腐食鋼材の表面形状をそのまま解析に反映させた結果と同程度の残存耐荷力推定が可能であり,本モデルによる腐食表面形状を用いて圧縮残存耐荷力推定のための解析シミュレーションが可能であることを図は示している。

Fig.11に残存耐荷力解析結果と平均腐食量の関係を示す。図の縦軸は3種類のモデルの結果をそれぞれ座屈荷重実験値で除して無次元化したものを,横軸は平均腐食量である。図から,平均腐食量の大きさによって概ね3つの領域に分けられ,それぞれ次のような特徴が認められる。

① 平均腐食量が0.0~1.0mmの区間

3種類のモデルに対する座屈荷重実験値の比の平均値はいずれも1.08であり,3種類のモデルにおける平均値の差はない。すなわち平均腐食量が0.0~1.0mmの区間においては,ポアソン乱数モデルを用いても,空

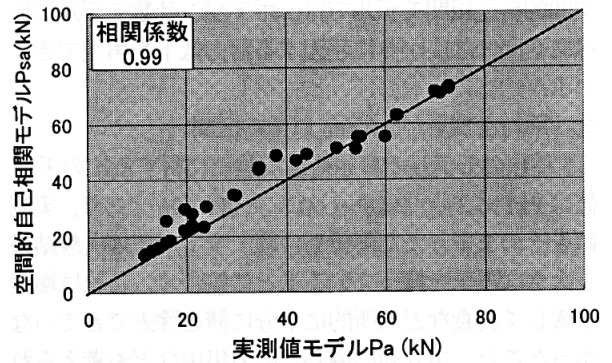


Fig.10 実測値モデルと空間的自己相関モデルの相関

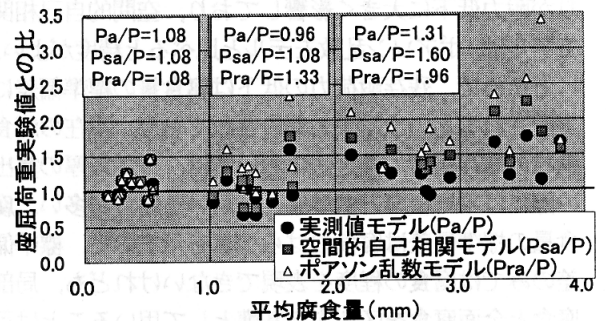


Fig.11 平均腐食量と残存耐荷力推定結果

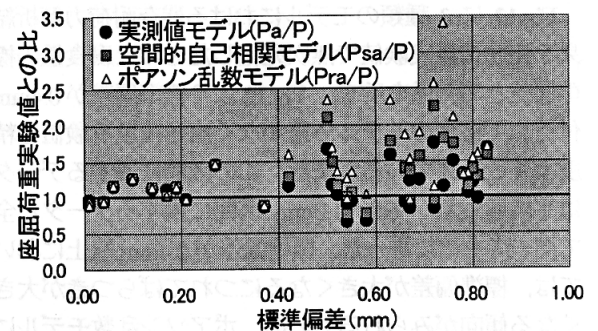


Fig.12 腐食量標準偏差と残存耐荷力推定結果

間的自己相関モデルを用いても圧縮耐荷力は変わらない。これは,座屈強度は板の曲げ剛性によって決定されるが,この範囲の腐食では全体の板の曲げ剛性は腐食領域の広がりに影響されないことを示す。また,座屈荷重は平均腐食量つまり平均板厚に支配されることも示している。

② 平均腐食量が1.0~2.0mmの区間

3種類のモデルの実験値に対する比の平均値はそれぞれ, $Pa/P=0.96$, $Psa/P=1.08$, $Pra/P=1.33$ とポアソン乱数モデルと実験値との間に大きなずれが生じた。このことは,この程度の腐食になると,腐食面の空間的な広がりが耐力低下に大きく影響することを示しており,腐食した板厚の平均値を一致させて,単に乱数を発生させて腐食表面を作成しただけでは腐食の空間的な広がりを十分に表現できないことを示している。一方,

空間的自己相関モデルでは、ポアソン乱数モデルに比べて空間的な広がり起因する耐力低下を再現できている。

③ 平均腐食量が2.0 mm以上の区間

3種類のモデルの座屈荷重実験値に対する比の平均値は $P_a/P=1.31$, $P_{sa}/P=1.60$, $P_{ra}/P=1.96$ であり、実測値をそのまま与えた解析も含めて全てが圧縮実験結果と大きな誤差を持っていることに気づく。これは腐食が激しく孔食など局所的に十分に錆を除去できていなかったこと、中立面の偏心、応力集中なども考えられるが、板要素の適用性についても今後調べておく必要がある。この範囲も、②と同様に腐食の空間的広がりが耐力低下に大きく影響しており、空間的自己相関モデルは、ポアソン乱数モデルと比べると精度がよい。

ところで、残存耐力の低下は腐食量の標準偏差に支配されるという結果も報告されており、現在の腐食鋼材の残存耐力推定法においては、有効板厚の算出の際には平均板厚と標準偏差を用いることが多い。腐食量の標準偏差は腐食のばらつきを示すので、標準偏差のみでは腐食の程度を表現できないけれども、局部腐食と全面腐食を区別する基準として用いることは可能で、腐食形態の違いを判断するには有効と考えられる。

Fig.12 に3種類のモデルにおける残存耐力解析結果を座屈荷重実験値で無次元化したものと腐食量の標準偏差との関係を示す。Fig.12 より標準偏差が0.4mm付近まではどのモデルも差がなく座屈荷重実験値を精度よくとらえている。また、この区間に属するデータは平均腐食量が0.0~1.0mm区間に属するデータと全て同一のものであった。標準偏差が0.4mm以上においては、標準偏差が大きくなるにつれてばらつきが大きくなる傾向がみられるものの、ポアソン乱数モデルに比べて実測板厚を用いた場合および空間的自己相関モデルの解析では精度良く残存耐力を推定できていることがわかる。このことから、乱数を直接使用した解析では、標準偏差が大きくなると推定精度が低下することが予想される。

5. まとめ

(1) 空間的自己相関モデルの表面形状の再現性

空間的自己相関モデルによる推定結果は、実際の表面形状と最大腐食深の発生位置が異なるにもかかわらず、実測結果による解析結果と非常に高い相関(相関係数0.99)が得られた。したがって、本モデルにより作成した腐食表面形状を用いて、実際の腐食鋼材と同等の

残存耐力の推定が可能である。

(2) 平均腐食量と空間的自己相関モデルの適用性

平均腐食量が0.0~1.0mm区間は腐食領域の広がりに起因する耐力低下は起こらない。また1.0~2.0mm区間は腐食領域の広がりに起因する耐力低下は大きく現われるが、空間的自己相関モデルはその耐力低下を評価できる。しかし、2.0mm~区間では腐食領域の広がりとともに、孔食による応力集中などによる耐力低下が極めて大きくなるため、本モデルをそのまま適用するのはむずかしい。したがって、距離減衰パラメータ β の見直し、腐食現象を時空間的にとらえたモデルの構築などの改善を行うとともに、応力集中を考慮した残存強度解析を行う必要がある。

(3) 残存耐力推定法における標準偏差の影響

腐食のばらつきを示す標準偏差は局部腐食と全体腐食をある程度判定することが可能である。そのため、局部腐食と全体腐食の違いによる耐力の低下量を推定するには有効と考えられる。しかし、今回のような全体腐食を扱う場合、標準偏差のみでは腐食の程度を示すことはできないので、残存耐力の推定には平均腐食量を基準にするのが望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) 村中昭典, 皆田理, 藤井堅: 腐食鋼板の表面形状と残留耐力, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1063-1071, 1998.
- 2) 加藤美幸, 野上邦栄, 山沢哲也: 腐食減厚に伴う合成桁の残存耐力の評価法に関する基礎的研究, 土木学会年次学術講演会公演概要集, 第55回, CS-88, 2000.
- 3) 中沢正利: 腐食鋼板の圧縮耐力特性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第55回, CS-86, 2000.
- 4) 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.
- 5) Nukuchal, W.K.: Simple and Effective Finite Element for General Shell Analysis, int.J.for Numerical Method in Engineering., Vol.4, pp.179-200, 1979
- 6) 藤井堅, 三木千尋, 藤井崇文: ステンレスクラッド鋼板の圧縮耐力と残留応力, 土木学会論文集, No.633/I-49, pp.181-192, 1999.10.
- 7) 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.

(2001年9月14日受付)