

孔食進展シミュレーションと表面不整形状

1100448 山本 健太郎

高知工科大学工学部社会システム工学科

50×50mm, t=2.1mmの鋼板を想定して、線状の塗膜損傷からの孔食進展予測式を点状損傷から2次元的に進展する孔食予測に拡張し、孔食進展シミュレーションを行なった。シミュレーション結果を促進腐食試験結果と比較した。シミュレーション結果と試験結果の比較から、板厚変動係数と断面積減少率の相関関係が再現できていないことが分かった。

Key Words : 孔食、孔食進展予測式、断面積減少率、板厚変動係数

1. はじめに

現在、既設の橋梁の維持管理が大きな問題となってきた。鋼橋では防食のために再塗装などが必要であるが、現状では財政悪化による予算不足で十分なメンテナンスが行われていない橋梁が多く存在する。このような橋梁の安全性確保のためには、腐食構造物の残存耐力の推定とともに、腐食の進展予測法の確立が必要である。

腐食鋼板の降伏や強度は、板厚変動係数とある程度の相関がある。したがって、適切にメンテナンスできない鋼橋の将来の耐力を推定するためのひとつの方法として、板厚変動係数を予測することが考えられる。本研究では、孔食の進展予測式をベースにした腐食シミュレーションによって、平均断面積減少率や板厚変動係数を予測する方法を提案し、予測精度に検討を加えた。

2. 既往の研究結果

文献1)では線状の塗膜損傷から進展する孔食の深さ、幅を予測する式が提案されている。しかし、平面的に広がる孔食を予測するためには、線状の塗膜損傷ではなく、点状の塗膜損傷から進展する孔食を考える必要がある。

このために文献2)では、線状の塗膜損傷からの孔食進展予測式を点状損傷から2次元的に進展する孔食予測に拡張し、孔食進展シミュレーションを行い、シミュレーション結果を促進腐食試験結果と比較した。

その結果、毎月の腐食発生数Nを適切に選べば、断面積減少率、板厚変動係数とも実験値とよく一致することが分かった。さらに促進腐食試験結果と近似するシミュレーション結果を算出する際に、経過月の増加とともに、最適なNは急激に減少するということが判明した。しかし、文献2)では実験値と近

似するシミュレーション値を求める為に毎月の腐食発生数Nを3, 6, 9, 12, 15ヶ月ごとに変更し、各月ごとに算出する方法を用いている為、一般性に欠け、促進腐食試験結果のない期間を予測することは出来ない。

このために本研究では、促進腐食試験結果の無い期間の孔食の進展を予測をすることが出来る一般性のある孔食進展予測式を新しく検討する。

3. 孔食進展予測式

本研究では文献2)で提案された孔食進展予測式の一部をそのまま用いる。

$$z(x, y) = \sum_i \alpha e^{-\left| \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{\beta} \right|^{2.5}} \quad \text{式(1)}$$

$$\alpha = n \times t^{0.7}, \quad \beta = m \times t^{0.6} \quad \text{式(2)}$$

ここに、 $z(x, y)$ は点 (x, y) における腐食深さ、 x_i, y_i は*i*番目の孔食中心の座標である。 α は孔食中心の腐食深さ、 β は腐食の広がりを表す代表長、 n, m は腐食環境を表すパラメータ、 t は時間で単位は月である。本研究では n, m 共に0.04, 1.0とした。

4. 孔食進展シミュレーション

促進腐食試験結果と比較するために、50×50mm, t=2.1mm 鋼板を想定して孔食シミュレーションを行なった。

文献2)より、経過月の増加とともにNは減少することが分かっている。これより本研究でも、時間の経過とともにNを何らかの方法によって減少させ、促進腐食試験結果と近似するシミュレーション結果の算出を試みることにした。具体的には、Nを指数

関数によって機械的に減少させる方法と、実腐食鋼板の観察から既存孔食が新たな孔食の発生を鈍らせるとの想定に基づいたアルゴリズムに従って減少させる方法の2種類のシミュレーションを行った。

比較する対象としては、促進腐食試験データの中、文献2)でも用いている点状塗膜損傷を与えた試験体の結果を同様に用いた。図1、図2に板厚変動係数、断面積減少率の実験値を示す。

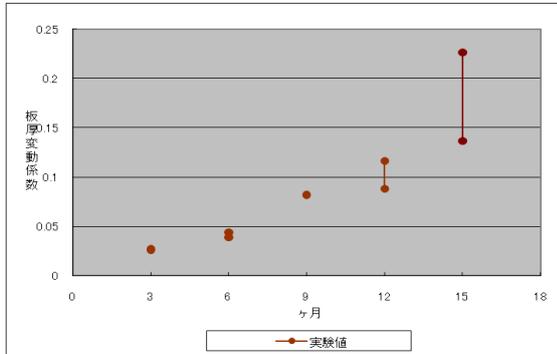


図1) 板厚変動係数

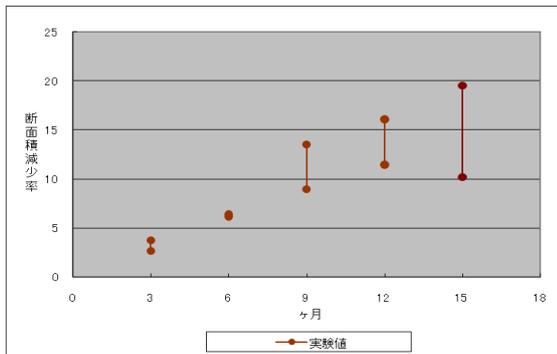


図2) 断面積減少率

4. 1 シミュレーション(1)

4. 1. 1 方法

シミュレーション(1)では、予め定義した関数に従って機械的にNを減少させる方法を検討した。具体的には、次式で各月の孔食発生数Nを算定した後、文献2)と同じ方法で腐食深さを求めた。

$$N = A \exp(-B * k^C) \quad \text{式(3)}$$

パラメータ A, B, C は、シミュレーション結果が実験値と適合するように試行錯誤的に定めた。検討したパラメータの組合せを表1に示す。

表1

case	A	B	C
1	550	1	0.5
2	200	0.4	1
3	700	1	0.6
4	780	1	0.7

本シミュレーションでは、Nを減少させることだけを目的としているため、用いた指数関数には合理的な根拠は無く、実現象との物理的な関係を論じることはできない。また、シミュレーションでは乱数を用いているので、試行毎に結果に多少の変動が生じるが、今回は特に考慮しないこととした。すなわち、文献2)で報告されている経過月の増加とNの減少を単一の予測式から算出することで、実験値と近似する結果を得ることが可能なか否かを検討するシミュレーションである。

4. 1. 2 結果

表1に示した4ケースのパラメータの組合せでシミュレーションを行い、実験値と比較した。最も実験値に近似した値を示したのが、ケース4であった。ケース4のパラメータを用いた時の板厚変動係数と断面積減少率を図3)、図4)である。

図から分かるように、板厚変動係数、断面積減少率とも、実験値からの偏差はある範囲内に収まっている。また、図3)、図4)から、シミュレーション結果では時間の経過とともに増加率が減少し、上に凸な曲線となっていることが分かる。

これを実験値と細かく比較してみると、断面積減少率は実験値、シミュレーション結果とも同様な変化を示しており良好な結果が得られていると言えるが、板厚変動係数については、実験値の変化はシミュレーション結果と異なる特徴を示していることが分かる。すなわち、シミュレーション結果では徐々に勾配が緩くなっているのに対して、実験値は経過月の増加に伴って変化の勾配が増しながら増加している。このような不整合を生じている原因が指数関数を用いたことにあるのかどうかは不明であるが、変化の傾向が異なることから、さらに経過月が増加した場合には実験値とシミュレーション結果の差が広がっていくことも予想される。現段階では、15ヶ月以上の実験値がないため、これ以上の評価は不可能であり、このシミュレーションの適用性については今後の研究課題である。

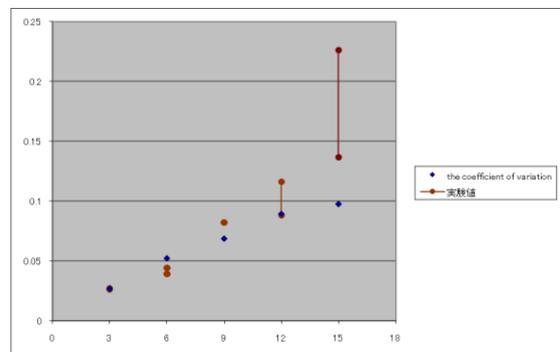


図3) 板厚変動係数

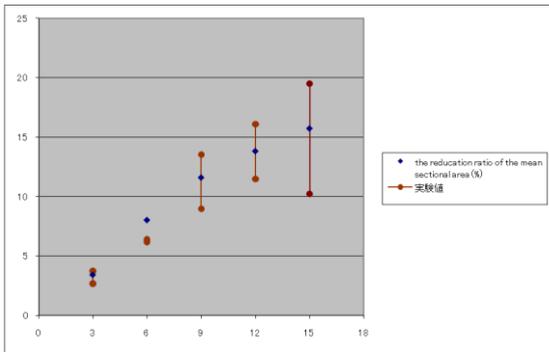


図4) 断面積減少率

4. 2 シミュレーション(2)

4. 2. 1 方法

実際の鋼板腐食試験の観察によると、既存の孔食発生箇所を中心から一定の範囲には新たな孔食は発生しにくいのではないかと想定された。シミュレーション(2)では、この想定に基づいて、より実現象に近いと思われる方法で孔食発生数 N を制御することとした。初月に発生した孔食中心から一定の距離内には新たな孔食は出来ないとし、この過程が毎月繰り返され、結果的に新たな孔食の発生数が減少していくというアルゴリズムを用いた孔食進展シミュレーションの検討を行う。

文献2)を参考に、毎月発生する新たな孔食 N を仮定し、既に発生した孔食中心からある半径 L の範囲に発生した新たな孔食は、その月に発生した孔食としてカウントしないというルールを基礎に様々なケースを検討した。

4. 2. 2 結果

毎月の孔食発生数 N は50, 70, 100, 120, 150, 170, 200の7ケース、孔食発生を制限する限界距離 L は1.5, 2.0, 2.5mmの3ケースとし、これらの全ての組合せについてシミュレーションを行なった。板厚変動係数、断面積減少率は、当然ながら L の増加にともなって減少する。時間の経過にともなう板厚変動係数や断面積減少率の変化の定性的傾向は L によって若干変化する場合もあったが、乱数の変動の影響以上のものであるかどうかは明らかでない。

一方、 N の影響はかなり異なった傾向を示す。 N が増加した場合、経過月の増加による勾配の変化が全体的に緩やかになる。乱数の変動の影響もあるので N と板厚変動係数や断面積減少率の関係を定量的に示すのは困難であるが、概して $N=120$ 以下では経過月の増加に伴って勾配の増加が認められるが、 $N=150$ 以上になると逆に緩やかになっていくように思われた。特に、 $N=200$ では、明確に増加率が減少する傾向が認められる。

N が大きい場合、初期の孔食発生数は増加するが、後期には既存の孔食のために新たに孔食としてカウントされるものが減少するため、経過月の増加にと

もなって増加率が減少するものと考えられる。

実験値では、断面積減少率の変化に同様な傾向が認められる。よって、 N の増加によって断面積減少率の近似度を向上させることは可能であると考えられる。一方、板厚変動係数の実験値は逆の傾向を示しており、 N の増加は必ずしも近似度の向上につながらないと言える。

このような条件の下で、最も良い近似を示すパラメータを探索した結果、 $N=200$ $L=1.8\text{mm}$ で断面積減少率を、 $N=120$ $L=1.5\text{mm}$ で板厚変動係数を最も実験値に近似させることが出来た。

板厚変動係数を最も良く近似する $N=120$ $L=1.5\text{mm}$ と、断面積減少率を最も良く近似する $N=200$ $L=1.8\text{mm}$ の二つのシミュレーション結果を実験値と比較したのが図5)、6)である。

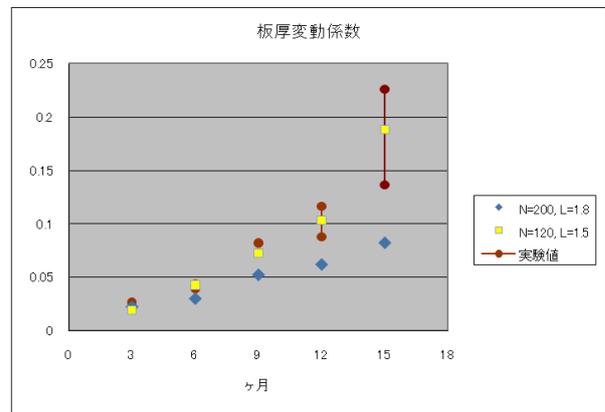


図5)

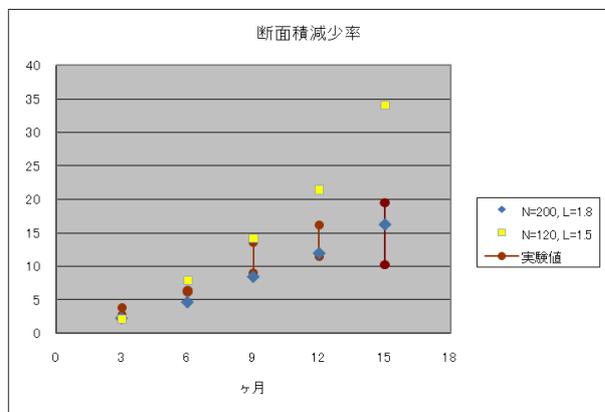


図6)

図から分かるように、 N , L に関わらず、板厚変動係数と断面積減少率の変化の傾向は同一である。一方、実験値では両者の変化が異なる傾向を示しているため、シミュレーション(2)で実験値を近似する結果を得ることは極めて困難と結論される。

5. 板厚変動係数と断面積減少率

文献2)を元に行ったシミュレーション1), 2)から、板厚変動係数、断面積減少率のどちらかを実験値に近似させることは出来るが、両方を実験値に近似す

るシミュレーション結果を算出することはできない。

しかし、実現象においては、断面積減少率と板厚変動係数には高い相関があることが知られており、一方の結果が一致すれば、他方も一致するのが自然であると解釈出来る。それゆえ本研究でシミュレーションによって算出された板厚変動係数、断面積減少率の相関性と、実現象での実験結果の二つの相関性が異なっている可能性が考えられる。そこで、シミュレーションと実現象の、それぞれの板厚変動係数と断面積減少率の相関性を比較してみる。

第一にシミュレーションの相関性について考察する。シミュレーション結果である図3)~6)では、板厚変動係数、断面積減少率の両方が同様の変化をしながら増加、減少している。このように、二つの軌道が同様の変化を起こしているということは、孔食の深さ方向への進展が断面積と変動係数に同程度の影響を及ぼしていることを意味している。

一方、促進腐食試験結果では、経過月の増加により板厚変動係数は勾配が急になり、断面積減少率は逆に緩やかな勾配へと変化している。すなわち、断面積はあまり減少しないにも関わらず変動係数が増加するような孔食進展が生じていると考えられる。このような現象が発生する理由としては、平均断面積に影響が少ない局部的に深い孔食の発生が考えられよう。

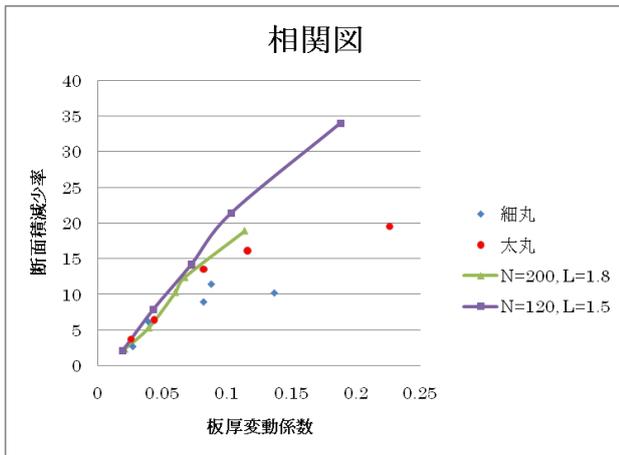


図7)

板厚変動係数と断面積減少率の相関関係を表したのが図7)であり、細丸、太丸は実験値を表している。この図より、シミュレーション値と実験値では板厚変動係数と断面積減少率が共に比例して増加することは同じだが、その増加の仕方が大きく異なっている事が分かる。シミュレーション結果は実験値に対して板厚変動係数の増加量が少なく、逆に断面積減少率は実験値に比べて多く増加している。図7から、板厚変動係数と断面積減少率の相関関係が実験値とシミュレーション値で異なっていることが分かった。

すなわち、本研究に用いたシミュレーション手法には本質的な問題が内包されていると判断せざるを得ない。

そこで、シミュレーションに用いた孔食進展予測

式について考える。本研究では文献2)より孔食の進展予測式として式(2)を用いており、式(2)では α を孔食の深さの進展を予測する式としている。 α の変化率は時間とともに若干変わるが、その変化は緩やかであって、特定時期を過ぎると孔食が一気に促進するというような特性は持っていない。しかし、文献2)では板厚変動係数が実験値に近い場合、同時に断面積減少率も実験値に近似した値となっている。文献2)は、毎月一定の孔食Nを発生させて最終的に実験値を近似するようなシミュレーションを行なっている。孔食位置は乱数を用いて算定しているため、偶然に距離の近い孔食が複数発生する可能性が高いと思われる。その場合には、局部的に深い孔食として算定されるため、断面積減少率よりも板厚変動係数の増加の方が大きくなるのではないかと考えられる。このことは、文献2)の方法では最終的には実験値に近似した値が算定されるものの、途中経過については実験のシミュレーションになっていないことを意味するようにも思われる。単一のアルゴリズムで途中経過を含めて孔食の進展を予測するためには、式2)の妥当性を含めて、更に検討が必要と考えられる。

6. 結論

- 1) 文献2)の方法に基づいて、単一のアルゴリズムで孔食進展を予測する方法の可能性について検討した。
- 2) 毎月の孔食発生数Nを指数関数で減少させる方法では、板厚変動係数、断面積減少率の両方を近似するようなシミュレーションは困難である。
- 3) 既存の孔食の付近では新たな孔食が発生しないという考えに基づいて孔食発生数を減少させる方法では、発生数Nを増せば時間経過に伴う変動係数や面積減少の増加が鈍る傾向を再現できるが、両変数を同時に近似するのは困難である。
- 4) シミュレーションと実験値の比較から、板厚変動係数と断面積減少率の相関関係が再現できていないことが分かった。

参考文献

- 1) 福岡弘次，藤澤伸光：鋼板の孔食進展予測，土木学会四国支部第14回技術研究発表会講演概要集，平成20年5月
- 2) 石井翔大，澤伸光：孔食進展シミュレーションと表面不整形性，土木学会四国支部第15回技術研究発表会講演概要集，平成21年5月