つラクタル次元を用いた耐候性鋼材の さび形状評価に関する研究

町田 純平¹・原田 隆郎²

¹学生会員 茨城大学大学院 理工学研究科博士前期課程(〒316-8511 日立市中成沢町4丁目12-1) E-mail: 19nm833x@vc.ibaraki.ac.jp

²正会員 茨城大学教授 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 日立市中成沢町4丁目 12-1) E-mail: takao.harada.67413@vc.ibaraki.ac.jp

耐候性鋼橋梁の外観評点におけるさび形状評価(粒子状・うろこ状・層状の判別)は、評価者によるば らつきが生じやすいという課題がある.本研究では、さびサンプルおよび実橋梁の鋼材表面さびの三次元 モデルを作成し、モデルから任意に抽出した複数のさび断面におけるフラクタル次元を利用して、さび形 状を定量的に評価する手法について検討した.その結果、さびサンプルでは評点3と評点4の組み合わせ 以外においてフラクタル次元の平均に統計的な差があることがわかった.また、さびサンプルでの評価結 果をさび形状判定の基準値に設定し、実橋梁の鋼材表面さびの形状評価を行った結果、フラクタル次元を 用いたさび形状評価と、さび形状だけでなくさびの粒子径や色などの外観も考慮して評価している専門家 の評価とは必ずしも一致しないケースがあることがわかった.

Key Words: weathering steel, rust shape evaluation, fractal dimension, statistical techniques

1. はじめに

耐候性鋼橋梁は,鋼材表面にさびの腐食進行を抑制す る保護性さびが生成されることにより,塗装の必要がな く,維持管理費の削減が期待できる¹⁾.この保護性さび の生成状況を把握するために,日本橋梁建設協会では**表** -1 に示す外観評点法にて経時的に評価をすることとし ている.外観評点法とは,さびを目視で確認し,粒径や 形状などの外観からさびを評点1から評点5の5段階で 評価する手法である.

しかし,耐候性鋼橋梁のさびは多種多様な外観を示す ため³,外観評点法の目視による評価では,点検者によ って評価がばらつく可能性がある.そのため,これまで に多くの研究が行われており,例えば森田ら³は,耐候 性鋼橋梁のさびを定量的に評価するため,セロファンテ ープ試験により得られた試料に対して画像処理を行い, さび粒子の最小径の最大値と分散を求め,その相関図か ら評点2以下と評点3以上を判別するしきい値を定めた. また,杉田ら⁴は,さび粒子の大きさと色調から定量的 にさびを評価する手法を提案している.

そこで本研究では、さび外観評価の評価基準において 特にばらつきが生じやすいと言われるさび形状に着目し、 粒子状・うろこ状・層状といった定性的な形状評価を定 量化する手法について検討した.そのため本研究では、 林 %による鋼材の腐食の進行度合いをフラクタル次元を 用いて評価した研究を参考に,耐候性鋼材表面のさびを 三次元モデルとして作成し,モデルからさび断面画像を 作成して,鋼材表面に発生するさびの断面形状をフラク タル次元を用いて定量化した.また,さびの状態を表す さびサンプル模型((一社)日本橋梁建設協会が開発・ 販売)を用いて,各評点のフラクタル次元の基準値を設 定するとともに,実際の耐候性鋼橋梁の表面さびの形状 評価を行った.

2. フラクタル次元を用いたさび形状評価の流れ

図-1に本研究におけるさび形状評価の流れを示す.

まず,三次元モデル化するさびサンプル模型および耐 候性鋼橋梁の鋼材表面の画像データを作成する. さびサ ンプル模型とは、(一社)日本橋梁建設協会が開発・販 売している評点 1~5 の耐候性鋼材のさびの状態を再現 した模型(大きさ:100×100 mm)である.1 つのさび サンプル模型もしくは鋼材表面1箇所に対して、様々な 角度から対象範囲がオーバーラップするように写真を 20~30枚撮影し、その写真を画像データとした.

次に、複数枚の画像を入力することで、画像に含まれ る領域の三次元モデルが作成できる PC ソフト AutoDesk

表-1 外観評点法の評価基準1)

状態	正常			要観察	異常
外観評点	5	4	3	2	1
さび平均 粒子	1mm程度以下		1~5mm 程度	5~25mm 程度	25mm 程度以上
さびの 色調	(赤) 茶色	暗褐 色	褐色~ 暗褐色	環境によって様々	
さび厚	200µmm 程度未満	400µmm程度未満		800µmm 程度未満	800µmm 程度以上
さび形状	粒子状		粒子状と うろこ状	うろこ状	層状





Recap photo を使用して三次元モデルを作成する.本研究 では、さびサンプルおよび耐候性鋼橋梁の鋼材表面の画 像データを入力することで三次元モデルを作成した.

続いて、作成した三次元モデルから、さびの凹凸形状をとらえるため、断面画像の作成を行う. 図-2 に示すように、作成した三次元モデル(サイズ $A \times A$ mm)から長さ x mm の細長い範囲を複数抽出し、抽出した範囲を $h \times b$ pixel のさび断面画像とした.

さらに、作成したさび断面画像に対して、図-3 に示 すようにフラクタル次元の算出を行う.本研究では、フ ラクタル次元の算出においてボックスカウント法を用い、 式(1)に示すフラクタル次元の定義に基づき、近似的に フラクタル次元 Dを算出する⁹. さび断面画像を、大き さ C の正方形のボックスで区切り、さび部分が含まれる ボックスの個数 Nをカウントする.対数軸のグラフ上に 複数の(C_i, N_i)をプロットし、最小二乗法により得られた 回帰曲線の係数の絶対値がフラクタル次元 D となる.

$$D = \log N / \log(1/C)$$
(1)



図-3 ボックスカウント法によるフラクタル次元の算出



さびサンプル評点4 さびサンプル評点5

図-4 さびサンプルの三次元モデル

表-2 解析条件

三次元モデルのサイズ A×A	100×100 mm
抽出する範囲の長さx	50 mm
断面画像の高さh	360 pixel
断面画像の幅b	1800 pixel
ボックスの大きさC	1,2,3,4,8,15,30,60,90 pixel

最後に、得られたフラクタル次元からさび形状の評価 を行う.具体的には、評点 1~5 のさびサンプルから得 られたフラクタル次元を統計的な手法により各評点の基 準値とし、実橋梁の三次元モデルから求められるフラク タル次元に対して基準値を適用することで、耐候性鋼橋 の鋼材表面さびの形状評価を行う.

さびサンプルを用いたさび形状評価における フラクタル次元の算出

さびサンプルの三次元モデルを図-4 に示す. 先述の とおり, さびサンプルは評点 1~5 のさび模型である. 解析条件を表-2 に示す. 三次元モデルのサイズ A×A は 100×100 mm, 断面画像を抽出する長さ x は 50 mm とし て, 30 箇所をランダムに抽出した. さび断面画像のサ イズは, 幅 1800 pixel,高さ 360 pixel とした. ボックスカ ウント法におけるボックスの大きさ Gは, G=1,2,3,4, 8,15,30,60,90 pixel の 9パターンとした. 表-3 にさびサ ンプル各評点のフラクタル次元の平均値,最大値,標準 偏差を示す. 表-3 より,評点が小さくなるほど, フラ クタル次元の最大値は大きくなることがわかる. フラク タル次元の平均値もフラクタル次元の最大値と同様に, 評点が小さくなるほど,その値が大きくなる傾向が見ら



れるが、評点3と評点4に関しては同程度の値を示した. 標準偏差に関しては、評点3のみ5.767×10³と他と比べ て値が大きかった. 図-5 に各評点の30個のフラクタル 次元の度数分布図を示す.縦軸は度数、横軸はフラクタ ル次元である. 画像に対するフラクタル次元は1.0から 2.0となるので、横軸は1.00~2.00の範囲とし、階級の幅 は0.05とした. 図-5より、評点が小さいものほど、分布 が右側に寄っており、フラクタル次元が大きいことがわ かる. また評点3は他のものと比べて標準偏差が大きい ことがわかる. 表-3および図-5から、全体的に評点が 小さいものの方がフラクタル次元の最大値、および平均 値が大きくなっている. これは、評点が小さいもののさ び形状はうろこ状や層状であり、粒子状に比べてさびが 粗く、形状が複雑になり、フラクタル次元の値が大きく なるからだと考えられる.

続いて,各評点のフラクタル次元の差を調べるため, 統計的手法である Tukey 法⁷を用いて,各評点の平均の 差を評価した.算出された検定統計量を表-4 に示す. 群数 5,誤差自由度 145,有意水準 5%のとき,検定統計 量 t>3.907で帰無仮説「2群の母平均に差がない」が棄却

表-4 算出された検定統計量

検定統計量	評点1	評点2	評点3	評点4	評点5
評点1	/			/	/
評点2	4.899				
評点3	18.230	13.331		/	
評点4	17.125	12.226	1.105		
評点 5	41.704	36.805	23.474	24.580	/





図-6 実橋梁さびモデルの一例

される. 表-4から評点3と評点4の組み合わせ以外では、 検定統計量tはすべて3.907以上となっており、「2群の 母平均に差がある」という結果が得られた.一方、評点 3と評点4の検定統計量は1.105であり、「2群の母平均 に差がある」という仮説は棄却されなかった.これは、 評点3と評点4はフラクタル次元の平均値にほとんど差 がなく、分布に関しても重なる部分が大きかったからで あると考えられる.外観評点法では評点3と評点4のど ちらにも粒子状さびが存在するとされており、同じ形状 が含まれるということから、フラクタル次元の平均には 違いが表れなかったと考えられる.

フラクタル次元による実橋梁の鋼材表面さびの形状評価

実際の耐候性鋼橋梁から 12 箇所の鋼材表面の三次元 モデル(以下実橋梁さびモデル 5-1~2-2 とする)を作成 し,さび断面画像からフラクタル次元の算出を行った. 図-6 に実橋梁さびモデルの一例を示す.さびサンプル と同様の解析条件(表-2)で、それぞれの実橋梁さびモ デルで、30 個のさび断面画像を作成しフラクタル次元 を算出した.表-5 に 12 個の実橋梁さびモデルから算出 した、フラクタル次元の最大値、平均値、標準偏差およ び、専門家による外観評点を示す.専門家による外観評 点とは、専門家が実橋梁さびモデルを見て判定した評点 である.表-5 より、専門家による外観評点が評点2と評 点 3 のフラクタル次元の最大値は、いずれも 1.6 以上と なった.一方で、外観評点が評点 4 のものでもフラクタ ル次元が 1.6 以上になったものもあった.フラクタル次

表-5 実橋梁さびモデルのフラクタル次元と外観評点

実橋梁さ	フラクタル次元			専門家によ
びモデル	最大値	平均值	標準偏差	る外観評点
5-1	1.536	1.353	5.252×10^{-3}	5
4-1	1.598	1.403	4.148×10^{-3}	
4-2	1.613	1.436	6.069×10^{-3}	
4-3	1.471	1.383	1.514×10^{-3}	4
4-4	1.681	1.404	3.753×10^{-3}	
4-5	1.553	1.470	1.513×10^{-3}	
3-1	1.675	1.608	1.960×10^{-3}	
3-2	1.727	1.606	3.872×10^{-3}	2
3-3	1.621	1.529	1.991×10^{-3}	3
3-4	1.636	1.532	2.505×10^{-3}	
2-1	1.630	1.561	2.660×10^{-3}	2
2-2	1.634	1.530	3.279×10 ⁻³	2

<さびサンプルによる各評点の基準値>



実橋梁さびモデルのフラクタル次元 図-7 さびサンプルによる各評点の基準値と実橋梁さびモデル のフラクタル次元の比較

元の平均値に関しては、専門家による外観評点が評点2 と評点3は1.5以上,評点4と評点5は1.4や1.3程度で あり、1.5 以下の値となった.標準偏差は、専門家によ る外観評点が同じ実橋梁さびモデルでも、大小さまざま であった. 図-7 に, さびサンプルによる各評点の基準 値と実橋梁さびのフラクタル次元の平均値を示す、横軸 はフラクタル次元 D, 棒グラフは 12 個の実橋梁さびモ デルそれぞれの 30 個のフラクタル次元の平均値,実線 は基準値(さびサンプルの評点1,評点2,評点3と評 点4、評点5のフラクタル次元の平均値)を示しており、 表-3に示したものと一致している。ただし、評点3と評 点4については、統計的評価においてフラクタル次元の 平均に差はなく、本検討結果においては、さび形状を評 価する基準値として区別しないこととした。なお、評点 3と評点4の基準値は平均値を使用した.本研究では、 この実線で示す値を耐候性鋼材の各評点のフラクタル次 元の基準値とし、基準値と実橋梁さびモデルのフラクタ ル次元を比較することで,評価を行った.

結果を見ると、実橋梁さびモデルのフラクタル次元の 平均値は、大きいものでも評点3と評点4の基準値程度 であった.一方, 表-5 にあるように,12 個の実橋梁さ びモデルの中には,専門家による外観評点が2または3 とされたものもあった.フラクタル次元による評価と, 専門家による評価が異なった理由としては,三次元モデ ルから算出されたフラクタル次元の平均値がさびの断面 画像から求まるさび形状を表しているのに対し,専門家 によるさび外観評点は,さび形状だけではなく,さびの 色やさびの平均粒径といった要素も考慮して,評価を行 っていることが考えられる.

5. おわりに

本研究では、耐候性鋼材に生成されるさびの三次元モ デルから取得したさび断面画像を用いて、耐候性鋼材の 外観評点における評価基準の一つであるさび形状をフラ クタル次元によって評価する方法について検討した.得 られた結果を以下に示す.

- ・耐候性鋼材に生成される各段階のさびの特徴を模型化 したさびサンプルのフラクタル次元から,評点3と評 点4以外の組み合わせで,フラクタル次元の平均に統 計的な有意差があることがわかった.
- ・さびサンプルの各評点のフラクタル次元を基準値として、実橋梁における12箇所の鋼材表面さびのフラクタル次元と比較した結果、さびの形状だけでなく粒子径や色などの外観も考慮して評価している専門家の評点と、フラクタル次元を用いたさびの形状のみの評価とは一致しないケースがあることがわかった。

参考文献

- 藤野陽三ほか:鋼橋の防食設計と LCC 評価(その1),橋 梁と基礎, Vol.38, No.1, pp.51-60, 2004.
- 高木優任ほか:耐候性鋼橋の維持管理と現状の課題,橋梁 と基礎, Vol.49, No.11, pp.57-63, 2015.
- 3) 森田千尋ほか:セロファンテープ試験の画像解析による耐 候性鋼材のさびの外観評価,土木学会構造工学論文集, Vol61A, pp.429-438, 2015.
- 4) 杉田尚男,野中陳旭,野添裕輔:画像処理による耐候性鋼 材のさび外観評価レベルの判別方法に関する研究,八戸工 業高等専門学校紀要,第45号,pp.55-60,2010.
- 5) 林健治:フラクタル次元による腐食の表面性状の評価に関 する基礎的研究,土木学会第67回年次学術講演会,1-130, pp.259-260,2012.
- 6) 塩谷昌典: ボックスカウント次元の計算, JAPLA シンポジ ウム 2003, pp.1-6, 2003.
- 7) 永田靖, 吉田道弘:統計的多重比較法の基礎, pp.35-40, サ イエンティスト社, 1997.