

19.5 年海洋曝露された鋼アングル材の腐食粗さ評価

名古屋大学 学生会員 ○渡辺尚彦
名古屋大学 フェロー会員 伊藤義人

1. 目的

港湾鋼構造物は激しい腐食環境下にあることから、構造特性低下に対する適切な補修，維持管理を行うことが必要となる．港湾鋼構造物の腐食性状は環境条件の違いにより部位に依存することが知られており，現在，文献1）では鋼管杭の腐食に関して腐食環境を6つのゾーンに区分し，それぞれのゾーンにおける腐食特性を示している．そのために部位に依存した腐食形状の適切な評価が必要とされるが，腐食による凹凸性状を定量的に評価するには未だ課題が多く残っている．

本研究では，腐食形態の部位依存性がはっきりと観察された，19.5 年間海洋曝露試験された鋼アングル材の腐食形状データを用いて，腐食粗さを評価し，それぞれの構造特性に影響を及ぼす形状特性と，それを得るために必要な情報との関連性を検討することを目的としており，また，空間統計に基づく擬似腐食モデルの適用性を示す．

2. 試験体計測

試験体は，静岡県大井川流域で 19.5 年間海洋環境下に裸曝露された，初期板厚 $t=20\text{mm}$ の普通鋼 L 型アングル材(SS400, 裸材)である．図-1 のように海洋側と沿岸側とを結ぶ線に平行な位置にある面を切り出し，さらに長さ 200mm ，幅 100mm の 17 枚の薄片に切断した．計測には卓上式レーザ式深度計測装置を用い（分解能 $0.1\mu\text{m}$ ）， 0.3mm 間隔で表面形状を計測した．平均海面 0mm とし，L.W.L.は -700mm ，H.W.L.は 850mm であり， $-1000\sim-700\text{mm}$ を海中部， $-700\sim850\text{mm}$ を干満帯， $850\sim2400\text{mm}$ を飛沫帯とする．

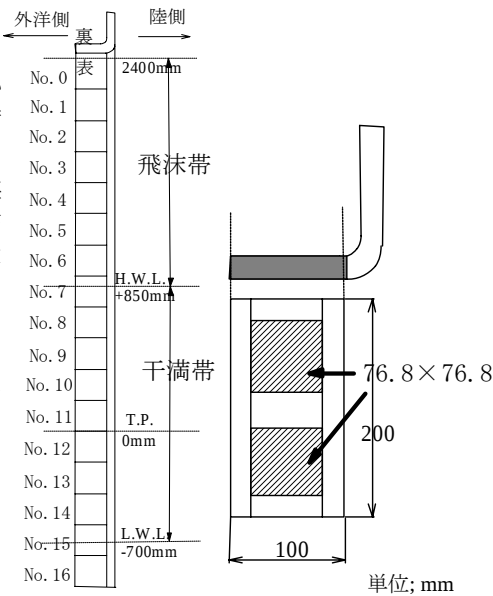


図-1 試験体概要

3. 分析法

(1)粗さ評価指標

BS7251 やISO7206 などでは，曲面という 3 次元データを対象に粗さ指標が規格化されている．振幅特性，空間特性，混成パラメータ，機能パラメータといった 4 グループの全 15 種類のパラメータのうち，本解析では応力集中，疲労といった構造特性に深く関わる表-1 に示される 5 種のパラメータを扱うこととした．ただし， S_{sc} は凹部に関する値とする．

表-1 粗さ指標

振幅 パラ メー タ	S_q	二乗平均粗さ (R.M.S.)	$\sqrt{\iint_a z^2(x,y)dx dy}$
	S_{sk}	歪度 (Skewness)	$\frac{1}{S_q^3} \iint_a z^3(x,y)dx dy$
	S_{ku}	尖度 (Kurtosis)	$\frac{1}{S_q^4} \iint_a z^4(x,y)dx dy$
混成 パラ メー タ	$S_{\Delta q}$	二乗平均平方根傾斜 (R.M.S. Surface Slope)	$\sqrt{\frac{1}{A} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \left(\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \right) dx dy}$
	S_{sc}	頂点曲率の算術平均 (Arithmetic Mean Summit Curvature)	$\frac{1}{N} \iint_{summits} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) dx dy$

定常性を有する分布の空間的な自己相関構造の分析法としてバリオグラムがある．バリオグラムは $range$ と $sill$ というパラメータによって空間構造を特徴づけ，またそれらの性質を持った空間構造を模擬することができる．本解析では理論バリオグラムとして球形モデルを使用し最小二乗法によりフィッティングを行った．

(2) ウェーブレットによる多重解像度分解

元々の腐食形状は，うねり，粗さ成分に分解できる．この腐食形状の成分分解に，2 次元ウェーブレット変換を利用し，ウェーブレット基底にはDaubechiesのウェーブレットを対称形に近づけたLA(8)用いた．解析対象は各部位の

端部を除いた $76.8 \times 76.8\text{mm}$ 枠のデータ (256×256 点，図-1) とし，表面形状を $D_1 \sim D_8$ 成分に分解した (D_8 が最も粗い成分である)．

$$\eta_r = \sum_1^8 D_i(x,y) \text{ を粗さ成分， } \eta_w = \sum_j^8 D_j(x,y) \text{ をうねり成分とする．}$$

各成分とスケール (mm)
D1: 0.3 D2: 0.6 D3: 1.2 D4: 2.4
D5: 4.8 D6: 9.6 D7: 19.2 D8: 38.4

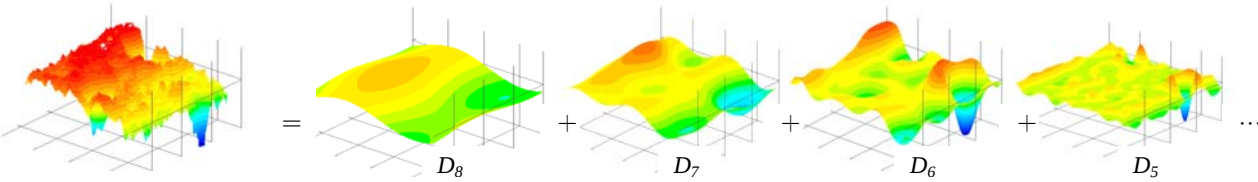


図-2 多重解像度分解

ここで、J はうねり成分と粗さ成分とを分ける閾値のスケールであり、本解析では J を変動させて特性を適切に分離できる適当なスケールを検討する。各成分の具体的なスケールを図-2 の上に示す。ウェーブレットによって抽出された粗さ成分に対し 3 次元粗さ指標とバリオグラム解析を適用し、部位による腐食粗さを特徴づけ、バリオグラム特性に基づく正規確率場モデルの適用性を確認する。

4. 解析結果

振幅パラメータ

図-3 はそれぞれ仮定した閾値以上のうねり成分に対する S_q の軸方向分布を示したものである。図の横軸は平均水面 0 とした時の軸方向高さを示している。D6 以下の成分を含んだものは、ほぼ D6~D8 成分と同じであることから Δ と $\square$ との間が閾となっているといえる。実際、バリオグラム解析に当たって D7, D8 を除去して初めて全ての部位におけるバリオグラムに sill が存在するようになった。従って、D7, D8 成分 (20mm 以上のサイズ) は粗さ解析をする際に除くべきゆるやかな勾配のスケールと考えられる。

図-4 は仮定した閾値までの粗さ成分に対する S_{sk} , S_{ku} の軸方向分布を示したものである。これらのパラメータは孔食の存在を示唆するものといえる。飛沫帯 2000mm 以上で、H.W.L. 付近 (500~1000mm), L.W.L. 上側 (-500mm 付近) において大きな値が見られるが、その卓越成分は飛沫帯では $\blacksquare$ (D1~D5), H.W.L. 付近では $\blacktriangledown$ (D1~D6) とスケールが異なっている。つまり、飛沫帯では 9.6~19.2mm スケール, H.W.L. 付近では 4.8~9.6mm スケールの孔食であることが分かる。なお H.W.L. 付近での腐食はフジツボの付着など生物起因によるものである。

混成パラメータ

混成パラメータに関して図-5 と図-6 に D7, D8 を除去した実測値とバリオグラムをもとに作成した正規確率場モデルとの比較を示す。バリオグラムシミュレーションは sill を 0.1 から 1.0 まで 0.1 刻み, range を 5 から 50 まで 5 刻みの計 100 パターンについて行った。図-5 は sill/range の値と $S_{\Delta q}$ の関係、図-6 は $S_{\Delta q}$ と S_{sc} の関係である。どちらも $\times$ がシミュレーション値, $\bullet$, $\circ$ が実測値を表している。図-5 に着目すると、実際の sill/range と $S_{\Delta q}$ 関係はばらつきが見られるが、ほぼ正規確率場モデルの関係曲線の内側に納まっている。図-6 に着目すると、実際の $S_{\Delta q}$ と S_{sc} 関係はシミュレーションモデルが示す直線関係の内側にやや緩やかな勾配で分布している。

以上のように混成パラメータ $S_{\Delta q}$ と S_{sc} またはバリオグラムの sill/range 値の間には、正規確率場モデルでは一本の曲線で結ばれる関係があり、それは実測値の包絡線となっている。 $S_{\Delta q}$ は最も細かい成分 (この例では 0.3mm スケール) によって決定される指標であるが、バリオグラムという粗い計測により得られる統計量における sill, range 値を用いて $S_{\Delta q}$ の上限値を予測可能であることが分かる。

5. 結論

19.5 年間海洋環境下に曝露された L 型アングル材を対象とし、ウェーブレットによる多重解像度分解、粗さ評価を通して次のような結果を得た。

1) 孔食を特徴付ける S_{sk} , S_{ku} に着目すると、9.6~19.2mm の飛沫帯, 4.8~9.6mm の H.W.L. 付近と部位によって異なるスケールの孔食が存在することを示している。

2) 20mm スケールの成分をうねり成分として除去した粗さ成分について正規確率場シミュレーションによって得られる、sill/range 値- $S_{\Delta q}$ 関係、 $S_{\Delta q}$ - S_{sc} 関係は実際の値の外側包絡曲線を描くことが分かった。このことは、粗い計測点データから $S_{\Delta q}$, S_{sc} の上限値を推測できることを示している。

参考文献

- 1) 沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル，沿岸開発技術研究センター，1997。
- 2) X.Q.Jiang L.Blunt, K.J.Stout, Three-dimensional surface characterization for orthopaedic joint prostheses, Proc Instn Mech Engrs Vol. 213, pp.49-68, 1999.
- 3) 貝沼，細見：鋼構造物材のコンクリート境界部における経時的腐食表面性状の数値シミュレーション，土木学会論文集，pp. 440-453, No. 2, Vol. 62, 2006.

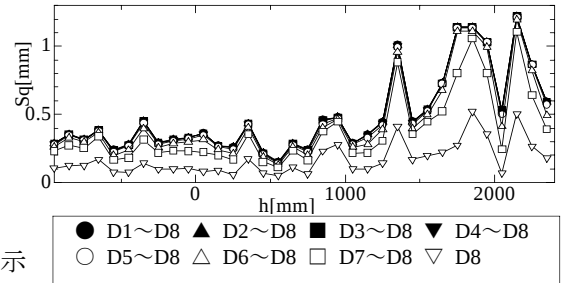


図-3 うねり成分に関する S_q 軸方向分布

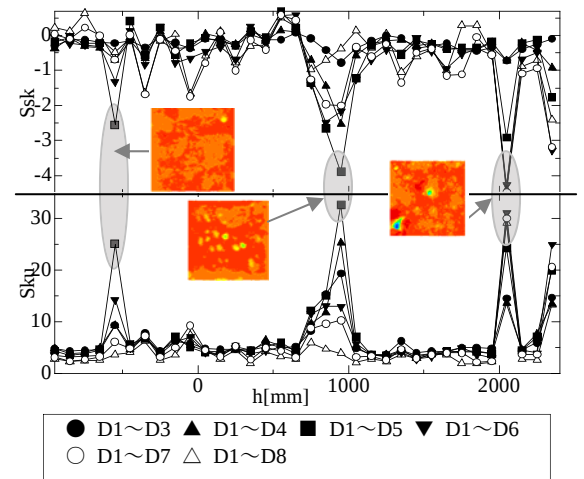


図-4 粗さ成分に関する S_{sk} , S_{ku} 軸方向分布

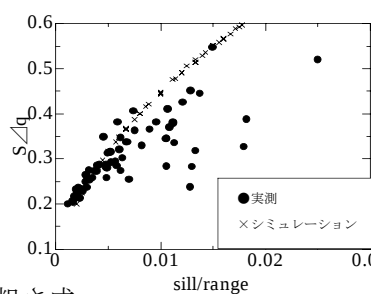


図-5 sill/range と $S_{\Delta q}$ 関係

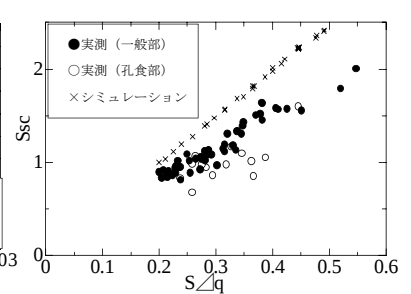


図-6 $S_{\Delta q}$ - S_{sc} 関係