

# 防食工の劣化度による港湾鋼構造物全体の評価に関する一考察

防食・補修工法研究会 柏木達夫

## 1. はじめに

港湾鋼構造物は一般的に、被覆防食工法と電気防食工法を併用施工した防食工の経年劣化度を随時点検診断することにより維持管理されている。この維持管理であるが、対象施設の規模の大きさに応じた分割区分を行い、調査測定対象を小ブロック化することにより肌理細かな点検診断を実施しているのが現状である。

港湾鋼構造物の維持管理の目的は、適用されている防食工の経年劣化度を表象する点検診断データを最大限に活用し、それらに基づき港湾鋼構造物全体の劣化状況を定量的に判定した上で評価を下し、対策を施すことにある。この様に全体評価という命題は非常に重要であるにも関わらず、これまであまり議論されて来なかったという残念な現実がある。その最大の理由は、2、3の試みはなされているとは言うものの、点検診断時の調査対象の抽出個数や調査データに基づく解析を定性面のみでなく、定量面をも勘案して実施する技術手法の確立が進んでいない点に帰せられる。

一般に、測定データは「大数の法則」や「中心極限定理」を基盤とする統計学に則った挙動を示すとされており、統計学を程良く運用する事で定量的な解析が可能である。そこで、本論では港湾鋼構造物全体の劣化度評価に確率・統計理論を適用し、定量的な技術の確立に狙いを絞り、試行錯誤の検討や考察を通して得られた結果を報告する。

## 2. 検討方法

### 2. 1 抽出本数

港湾鋼構造物の点検診断を実施するに当たり、事前に調査個数を決める必要がある。測定データの信頼性からも防食工の劣化状態が最悪ランクのものが全く含まれない様な抽出は避けねばならない。例えば、海洋塗装工の劣化度に関しては表1に示す様な劣化度評価基準はあるものの、4種のグレード各々の割合(占有率)については何もない状態である。

その理由としては、建設後の経過年数や施設の置かれている環境などの要素に左右され、一概には決められない事などが考えられる。確かに難しい問題ではあるが、実現場に於ける数多くの経験を通して蓄積してきた膨大なデータの分析などから、最悪グレードaの割合を5%程度と見做しても大きな誤りは来さないものと判断される。

表1 海洋塗装工の劣化度評価

グレード	塗膜状態	欠陥面積率
a	さびを伴う剥れ・割れが広範囲に発生	10%以上
b	さびを伴う剥れが広範囲に発生	0.3%以上～10%未満
c	塗膜の剥れ・割れが点在	0.03%以上～0.3%未満
d	初期状態を保持し、健全な状態	0.03%未満

そこで今、調査対象施設 A が 200 本の鋼管杭から成り立っているものとする、先の前提条件よりグレード a は 5% であるから、10 本程度存在すると推察される。ここで抽出サンプル数を 10% の 20 本とすると、200 本の鋼管杭から 20 本を抽出する組み合わせは、数学的に  ${}_{200}C_{20}$  と表される。この 20 本の中にグレード a が 1 本も含まれない場合の組み合わせは、 ${}_{190}C_{20}$  である。因って、本事象の生じる確率は  ${}_{190}C_{20}/{}_{200}C_{20}=0.34$  となる。因って、少なくともグレード a が 1 本含まれる確率は  $1-{}_{190}C_{20}/{}_{200}C_{20}=0.66$ 、即ち 66% となる。

この値は統計学の正規分布に於ける分散度合を示す  $\sigma$  (標準偏差値) までの範囲に含まれる割合である 68% に近く、十分に信頼できるものと見做せるが、更に安全率を考慮し、閾値としての確率が 80% 以上なら信頼度に問題はないものとする。この割合に適する抽出サンプル数は下表に示す様に 29 本となり全本数の 14.5% で良いことになる。

表 2 抽出本数と確率の関係

抽出本数	a を含まない確率	a を含む確率	確率 (%)
29 (14.5%)	${}_{190}C_{29}/{}_{200}C_{29} = 0.20$	$1-{}_{190}C_{29}/{}_{200}C_{29} = 0.80$	80
21	${}_{190}C_{21}/{}_{200}C_{21} = 0.32$	$1-{}_{190}C_{21}/{}_{200}C_{21} = 0.68$	68

全く同様な方法で施設の杭の総本数に応じた抽出本数を算定すると、以下に示す図 1 が得られる。総本数が 300 本以上になると、抽出本数は 30 本に飽和し、800 本を超えると 31 本になる事が分かる。そこで、抽出本数を一歩掘り下げ、その一般化を検討してみる。

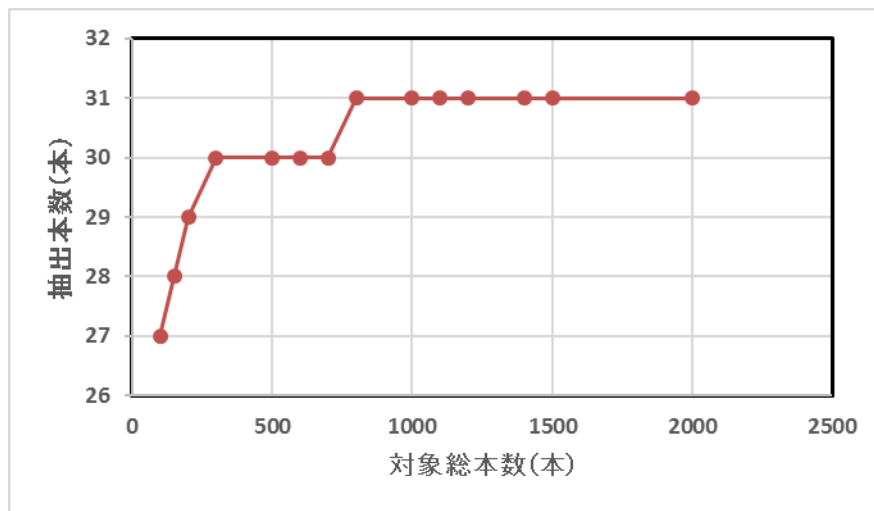


図 1 対象総本数と抽出本数の関係

調査対象総本数を N 本、グレード a の占有率を P%、a が少なくとも 1 本含まれる確率を R% および最低限の抽出本数を T 本とすると、a が 1 本も含まれない確率は、

$$1 - R/100 = \frac{(N - \frac{PN}{100})CT}{NCT} = \frac{T!(N-T)! \left(1 - \frac{P}{100}\right)^N}{N!T! \left\{ \left(1 - \frac{P}{100}\right)^{N-T} \right\}}$$

N= 200 P=5 を代入して、

$$\frac{(200 - T)! 190!}{200! (190 - T)!} = \frac{(200 - T) \cdots (191 - T)}{200 \times 199 \times \cdots \times 191}$$

$$\left(1 - \frac{T}{191}\right)^{10} \leq 1 - R/100 = \left(1 - \frac{T}{200}\right)\left(1 - \frac{T}{199}\right)\dots\left(1 - \frac{T}{191}\right) \leq \left(1 - \frac{T}{200}\right)^{10}$$

$$1 - \frac{T}{191} \leq \sqrt[10]{1 - R/100} \leq 1 - \frac{T}{200}$$

$$191\left(1 - \sqrt[10]{1 - R/100}\right) \leq T \leq 200\left(1 - \sqrt[10]{1 - R/100}\right)$$

これより  $T \geq \left(\left(1 - \frac{P}{100}\right)N + 1\right)\left(1 - \sqrt[PN/100]{1 - R/100}\right)$  が成立する。

以上の議論は、あくまでも抽出する本数に限定したもので、全本数の中からどの杭を選定するか等の問題については、腐食環境などを十分に勘案し、別途決定する必要がある。

## 2. 2 測定位置

被覆防食工の場合は、飛沫帯の上端部、中央部および下端部の時計座標の0、3、6および9時の位置で調査する。因って、データ総数は12となる。

電気防食工の場合も防食対象範囲内で海洋塗装工同様の調査を行い、得られたデータの平均をとり、その値を選定された1本の鋼管杭のデータとする。

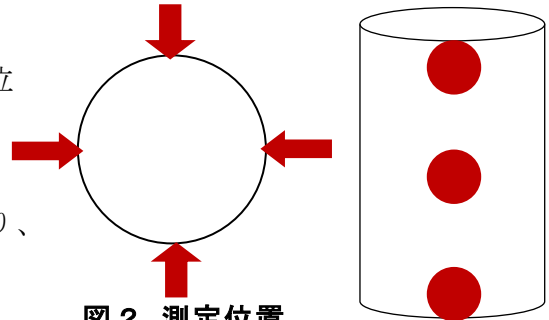


図2 測定位置

## 2. 3 劣化度の数量化

表1で示した様に各々の防食工には、劣化状態をグレード別にランク分けする方法があるが、定性的な区分のため定量的な評価を行うには難がある。そこで、既に述べた統計学を援用し、劣化度の序列、専有率および評価点を決め定量的な検討を行うことにする。

防食工の劣化度分布についても、難しいものはあるものの、これまでに培った多くの現場経験や蓄積した膨大な数のデータに基づく知見から、世の中の事象の殆どが従うと言われている図3に示す正規分布に当てはまるものと見做し、以下の議論を進めて行く。

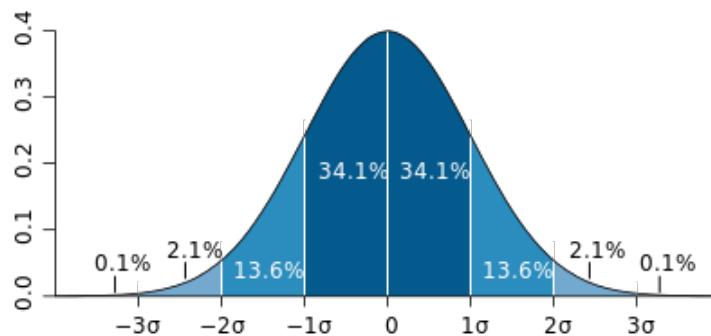


図3 正規分布グラフ

そこで、まずグレードa~dの占有率の各々が標準正規分布表の面積にリンクすると仮定し、過去のデータの分散度合を勘案することにより各々のグレードの専有範囲を決定した。

例えば、グレード d の専有範囲を  $\mu \pm 0.85\sigma$  (標準偏差値) とすると、正規分布表から専有面積は 60% になる。他のグレード面積も同様に計算し、a の値を基準とした面積比を、グレード d を基準値とした評価点比に換算し、それらの値を各々 10 倍することにより、評価点をグレード別に 1、2、4 および 10 点とした。結果と詳細を表 3 に示す。

表 3 劣化度の専有面積と評価点の関係

グレード	専有範囲	専有面積 (%)	専有面積比	評価点比	評価点
d	$\mu - 0.85\sigma \leq \leq \mu + 0.85\sigma$	60	12	1.00	10
c	$-1.45\sigma + 0.85\sigma \leq \leq 1.45\sigma - 0.85\sigma$	25	5	0.42	4
b	$-1.96\sigma + 1.45\sigma \leq \leq 1.96\sigma - 1.45\sigma$	10	2	0.17	2
a	$-\infty + 1.96\sigma \leq \leq \infty - 1.96\sigma$	5	1	0.08	1

## 2. 4 防食工の総合平均評価点基準表

調査鋼管杭 1 本より得られる 12 個のデータの平均値を算定する場合、通常使われる相加平均値ではなく、相乗平均値とした。この理由は、評価点比を最大で 10 とし、劣化度比をより鮮明に反映させる意図に相加平均値ではそぐわない懸念が大きいためである。

因みに、データ数が Q、R、S、T、U、V、W、X、Y および Z の 10 個である場合、その相乗平均値は  $^{10}\sqrt{(Q \cdot R \cdot S \cdot T \cdot U \cdot V \cdot W \cdot X \cdot Y \cdot Z)} = (Q \cdot R \cdot S \cdot T \cdot U \cdot V \cdot W \cdot X \cdot Y \cdot Z)^{1/10}$  である。

29 個のデータから成る施設 A の序列評価を行う場合の平均値も、全く同様な理由により相乗平均値を適用する。この 29 個のデータの平均値により施設 A の最終序列が決まる事になる。そこで、評価点の良否が両方向に極端に分布する場合 (I、V)、今回の占有面積に基づく割合で良否方向に分布する場合 (II、IV) および全評価点が均等に分布する場合 (III) の 5 ケースを仮定し、各々の平均値を算定した。その結果を表 4 に示す。

表 4 評価点分布に応じた平均値

ケース	評価点の個数分布					劣化状況
	10	4	2	1	平均値	
I	24	5	0	0	8.5	健全期
II	20	6	2	1	6.8	劣化懸念期
III	8	7	7	7	3.1	劣化過渡期
IV	2	4	3	20	1.5	劣化進展期
V	0	0	5	24	1.1	劣化深刻期

このような極端なケースの解析により得られた平均値は、防食工の劣化状況を示すバロメータとなり有用である。そこで、現場実務で培った経験などを踏まえ、この平均値と評価点の分布状況から推定される一般化された劣化状況についても表 4 に示した。

また、このような仮定により得られた平均値は閾値としての役割も合わせ持っており、劣化度の定量的な序列分けを行う場合、序列の境界値として使用することが出来る。この観点に立ち、総合平均評価点に応じた序列と対策を検討した結果を表 5 に示す。

表 5 総合平均評価点に応じた序列と対策の関係

総合平均評価点	序列	対策
8 ≧	D	不要
6 ≧ < 8	C	暫く検査継続
3 ≧ < 6	B	部分補修
1.5 ≧ < 3	A1	全面補修、部分取換
1 ≧ < 1.5	A2	全面取換

### 3. 検討結果と考察

これまで記述してきた内容から確率・統計学による対象の抽出個数、劣化グレードの占有率、評価点分布による平均値および防食工の総合平均評価点と対策について理解頂けたものと思うが、やや具体性に欠けるため理解の妨げとなっている事も事実である。

そこで、一般的に適用されている海洋塗装工と電気防食工を取り上げ、数ケースの評価点の個数分布を仮定し、解析を実施することにより、全体評価に関し検討を加えた。

#### 3. 1 海洋塗装工の事例

海洋塗装工の劣化度評価基準は表 1 に示したものを援用し、現実にかかる可能性の大きな 3 ケースの評価点分布を考えてみる。施設 A の評価点分布に沿って平均値を算定し、施設全体を評価した結果を表 6 に示す。

表 6 海洋塗装工の事例計算

ケース	評価点の個数分布					劣化状況
	10	4	2	1	平均値	
I	20	6	3	0	7.4	劣化潜伏期
II	12	4	3	10	3.4	劣化過渡期
III	0	3	6	20	1.3	劣化深刻期

例えば、ケース I の場合は、

$$\text{平均点} = \sqrt[29]{(10^{20} \times 4^6 \times 2^3)} = (10^{20} \times 4^6 \times 2^3)^{1/29} = 7.4 \text{ となる。}$$

これらの結果を表 5 に示す総合平均点評価基準を援用し、各々のケースの序列と対策を検討した結果を表 7 に整理して示す。

表 7 海洋塗装工の事例検討結果

ケース	平均値	序列	対策
I	7.4	C	暫く検査継続
II	3.4	B	部分補修
III	1.3	A2	全面取換

#### 3. 2 電気防食工の事例

電気防食工の場合は、表 8 に示す様に防食対象施設の電位や設置陽極の取付け状況などから劣化度を判定している。海洋塗装工と同様に施設 A の評価点分布を現実的な 5 ケースほど仮定し、検討を加え、全体評価を行った結果を表 9 に示す。

表 8 電気防食工の劣化度評価

グレード	評価点	電位の範囲 (海水塩化銀電極基準)	陽極の状態
a	1	-800mV <	陽極の脱落または全消耗
b	2	-825mV <      ≤ -800mV	陽極取付けに不具合(ぶら下がり)
c	4	-850mV <      ≤ -825mV	小さな変状あり
d	10	≤ -850mV	変状なし

表 9 電気防食工の事例計算

ケース	評価点の個数分布					劣化状況
	10	4	2	1	平均値	
I	23	6	0	0	8.3	健全
II	20	6	2	1	6.8	劣化潜伏期
III	9	6	6	8	3.1	劣化過渡期
IV	4	3	6	16	1.8	劣化進展期
V	0	0	6	23	1.2	劣化深刻期

例えば、ケースⅢの場合は、

$$\text{平均点} = \sqrt[29]{(10^9 \times 4^6 \times 2^6 \times 1^8)} = (10^9 \times 6^6 \times 2^6 \times 1^8)^{1/29} = 3.1 \text{ となる。}$$

後は海洋塗装工と全く同様な検討を加える。これらの計算結果に表 5 に示す総合平均評価点基準を援用し、各々のケースの序列と対策を検討した結果を表 10 に整理して示す。

表 10 電気防食工の事例検討結果

ケース	平均値	序列	対策
I	8.3	D	不要
II	6.8	C	暫く検査継続
III	3.1	B	部分補修
IV	1.8	A1	全面補修、部分取換
V	1.2	A2	全面取換

#### 4. まとめ

港湾鋼構造物に施されている防食工各々の劣化度データに確率・統計学を援用し、施設の維持管理業務を進めていく上でポイントとなる施設全体の劣化度を推定評価する手法を提案し、理論的かつ定量的な検討を加えてみた。確率・統計学を適用することにより理論面から提案した本評価手法が、実務現場で実施されている維持管理業務の調査解析手法の一つとして適用され、導出された結果と防食工の実態を比較することにより現実に沿う形に改善された理論となり、遠くない将来、本手法が維持管理計画に反映される日が来ることを期待しつつ結びとしたい。