

# 港湾鋼構造物に於ける防食工の劣化曲線に関する一考察

防食・補修工法研究会 柏木達夫

## 1. はじめに

腐食被害から港湾鋼構造物を保護するため、下部工には施工性、耐久性、工期および初期コストなどを勘案し最適な被覆防食工法や電気防食工法が適用される。しかし、防食工法を適用すれば腐食問題は必ず解決するという訳でもない。これは防食工法に使用される防食材料の持つ性能が、半永久ではなく年月の経過に伴い低下し劣化するという自然の摂理を避けて通ることができないためである。

しかし、経済性の面からも港湾鋼構造物には、少なくとも設計供用期間を満たすだけの耐久性が要求される。この耐久性を保持するためには、下部工に施された防食工法(今後は防食工と記述する)の性能低下を予測し、計画的な点検診断や対策を通して防食保有性能を適切に維持管理していくことが必要である。

電気防食工法(流電陽極方式)が適用された場合には、防食性能の低下を推測するバロメーターには適用されているアノードの消耗質量をあてて問題ないと思われる。この値はアノード発生電流と密に関連しており、ファラデーの法則から経時変化に伴い直線的に減少すると見做す事が出来るため、性能の低下度合いの推測は容易である。

これに反し、被覆防食工の場合は、防食性能を低下させる多数の因子が複雑に絡み合い、バロメーターを特定することは困難である。しかし、防食工の性能低下(今後は劣化曲線と記述する)を予測せずには、被覆防食工の防食性能を保持するための計画的な維持管理も不可能となる。

この様な観点に立ち、これまでの維持管理は実験データやフィールドに於ける豊富な経験に培われた定性値を組み合わせるにより得られる半定量的な劣化曲線により対処してきたのが実体である。しかし、何時までもこの様なファジー状態のままでは今ひとつ説得力に欠けるきらいがある。十分とは言えないまでも、ある程度は定量性に裏付けられた劣化曲線が今後の維持管理に不可欠である事は論を俟たない。

そこで、劣化度という時間の経過に影響される値の解析に最も適している微分方程式を適用し、フィールドに於ける経験値などを踏まえつつ、それらに理論面からの補足検討を加え、現実の劣化状態に近似する様な曲線を模索してみる。

## 2. 被覆防食工の劣化曲線

アノード消耗量に依拠する電気防食工の劣化はリニアに減衰するため直線とされて来た。これに対し、被覆防食工の劣化は使用されている被覆材の特性に依存するため直線とはならない。外部から被覆への急激な強い衝撃力でも働かない限り、設計値のレベルを長期にわたり保持しつつ、次第々、徐々に劣化していくものと推定される。このため被覆防食工の劣化曲線は、**図 1** に示す様になるであろうと議論されてきた。

そこで、この劣化曲線がどのような減衰関数に近似しているかについて考えてみたい。この曲線の形状から推測される関数は、徐々に右肩上がりする曲線である双曲線関数である。**図 2**に適切な条件を与えて作成したカタナリー型曲線を示す。縦軸にプロットした値が異なるので一致はしないものの、かなり良い近似と云える。

この事実からも曲線形状を念頭に置きつつ、定量性をも加味した理論面からの検討を行うことにより、実用的かつ理論的な劣化曲線の実体に迫ることとする。

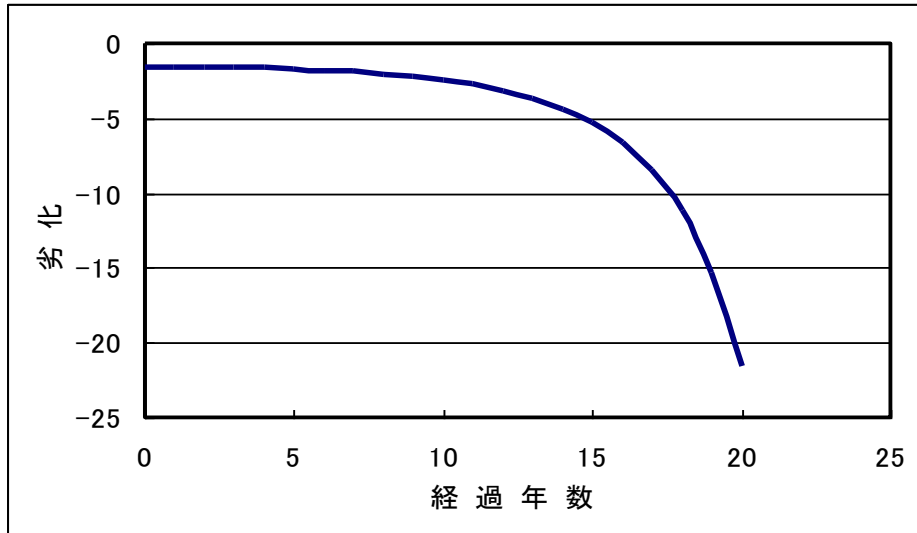


図 1 代表的な被覆防食工の劣化曲線

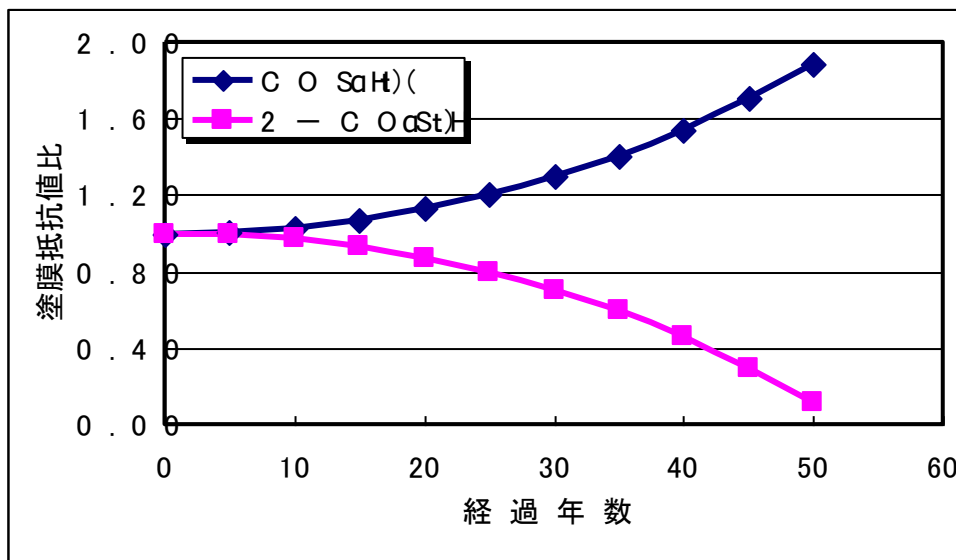


図 2 カテナリー型劣化曲線

### 3. 検討方法

#### 3. 1 劣化度

実フィールドに於ける被覆防食工の劣化は、時間の経過に伴い徐々に減衰すると考えられる。この減衰により劣化曲線の形状が決定されると考えても問題はないと思われる。

一般的に被覆防食工の劣化は、適用される環境に於ける温度( $T$ )、圧力( $P$ )、体積( $V$ )および時間( $t$ )などに影響され、これらの因子の独自な変化により決定される。

即ち、被覆防食工の劣化状態を  $D$  という文字で表すことにすると、この  $D$  は先に述べた種々の因子の関数と見做す事ができる。この現象を数学的に解釈し、説明すると以下の様に記述できる。

劣化状態とは、温度や圧力などの因子の独自の微小変化(各々の因子が独立に変化する)に影響され、それら個々の変化を加算したものが全体の変化となって現れるものである。一般的には各々の因子の偏微分係数を用い、以下に示す全微分方程式で示す事が出来る。

$$dD = \frac{\partial D}{\partial T} dT + \frac{\partial D}{\partial P} dP + \frac{\partial D}{\partial V} dV + \frac{\partial D}{\partial t} dt \quad \dots \dots (1)$$

被覆防食工が設置される自然環境に於いては、温度や圧力および体積の劣化に及ぼす変化は小さくなく、劣化を律速するものは時間という長期因子であることは、これまでに培われた経験からも十分納得できるものと思われる。即ち、時間変分以外は無視しても大きな問題はないものと考えられる。

すると式(1)は、 $\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{dD}{dt} \quad \dots \dots (2)$  と時間( $t$ )のみの関数となる。

この劣化状態  $D$  を時間  $t$  で1回微分した値である  $dD/dt$  を劣化度と定義する。

ところで、被覆防食工の劣化評価を議論するにあたり最も大事なことは、被覆防食工の劣化を代表させるものを何にするかという事である。即ち、劣化具合を評価する指標に何を選定すべきかを見極める必要がある。

被覆防食工のグレードを左右するものとしては、従来から塗膜抵抗値や吸水率および膜厚などが評価されてきた。しかし、変化の極端に小さなものや実測の困難なものでは、効率良くデータが採れないため劣化曲線を描く事は困難である。そこで、指標とすべきと考えられる因子を個々に採り上げ、様々な角度から検討を加えた結果、使用実績が多く信頼度も高いとされる塗膜抵抗値( $\omega$ )がベストとの感触を得たため、この値を指標に選び劣化曲線の検討を行うものとする。

塗膜抵抗値( $\omega$ )を劣化状態として選定したことから、劣化のスピードとも云える劣化度は  $d\omega/dt$  と記述され、そのディメンションは“ $\Omega \text{ m}^2/\text{年}$ ”となる事が分かる。

### 3. 2 加劣化度

被覆防食工の劣化曲線を検討するにあたってのポイントは、年毎の劣化の進展度合いを把握することにある。これは先ほど述べた劣化度を把握する事に他ならない。ところで、この劣化進展度合いであるが、フィールドに於ける被覆防食工の劣化具合の観察経験からしても毎年同じ劣化度で進展する訳ではないと考えられる。これは言葉を返せば、劣化度も年数の関数として年毎に増加するものと推定される。

即ち、劣化曲線を描くにあたっては、年毎の劣化度の変化を表す、ディメンションで表せば“ $\Omega \text{ m}^2/\text{年}^2$ ”という係数が必要となる。この係数は劣化度の変化率であり、劣化度である  $d\omega/dt$  を再度微分した  $d^2\omega/dt^2$  と記述される。この関係は速度と加速度の関係と近似しているため、この因子を加劣化度と定義する事にする。

これら塗膜抵抗値や劣化度および加劣化度などの関係を用い、被覆防食工の劣化曲線について検討を加えることにする。

## 4. 検討結果と考察

### 4. 1 加劣化度が定数の場合

まず、面倒で複雑な関係を有する条件の検討は後回しにし、単純で考え易い条件である加劣化度が被覆材の塗膜抵抗値などに関係せず、独立因子として常に定数である場合を想定する。すると、劣化状態は以下の様な微分方程式で表されることになる。

$$\frac{d^2 D}{dt^2} = \frac{d^2 \omega}{dt^2} = -\beta \quad \dots \dots (3)$$

この  $\beta$  は定数であり、劣化は負方向の因子であるため負の符号(マイナス)が付いている。

この微分方程式を解くと、 $\frac{d\omega}{dt} = -t\beta + C \quad \dots \dots (4)$  となるが、

$t=0$  の時、 $d\omega/dt=0$  であるから、 $C=0$  となり、 $\frac{d\omega}{dt} = -t\beta \quad \dots \dots (5)$  である。

これを更に積分する事により、 $\omega = -\frac{1}{2}t^2\beta + C \quad \dots \dots (6)$  が得られる。

ここで、初期条件である  $t=0$  で  $\omega = \omega_0$  を使い、 $\omega = \omega_0 - \frac{\beta}{2}t^2 \quad \dots \dots (7)$  となる。

この  $\omega_0$  は施工当初の塗膜抵抗値を示している。

尚、劣化曲線を描くに当っては、劣化の度合いが把握し易い様に横軸には経過年数、縦軸には塗膜抵抗値の状態値と初期値との比をプロットすることにする。即ち、縦軸は

$$\frac{\omega}{\omega_0} = 1 - \frac{\beta}{2\omega_0} t^2 \quad \text{という値を表わすこととする。}$$

まず、 $\omega_0$  の値であるが、通常適用されている  $10^6 \Omega \text{ m}^2$  とし、 $\beta$  の値は経験などに鑑み 500、1000 および  $5000 \Omega \text{ m}^2/\text{年}^2$  として検討する。これら二つの値が決まると、適用されている

被覆防食工を最悪状態まで使用した場合の年数を示す値である  $\sqrt{2\omega_0/\beta}$  は、劣化曲線と横軸とが交わる点の値として算定できる。

これまでに述べた検討方法に基づき計算した結果を整理し、加劣化度と耐用年数の関係として表1に記載する。 $\beta$  の値の増加とともに、耐用年数が短くなる事が分かる。この現象は理論面からも当然の帰結と思われる。

これらの関係を基に描いてみた被覆防食工の劣化曲線を表2や図3に示す。

表1 加劣化度と耐用年数の関係

$\beta (\Omega \text{ m}^2/\text{年}^2)$	250	500	1000	2000	3000	5000
$\sqrt{2\omega_0/\beta}$ (年)	141.4	63.2	44.7	31.6	25.2	20.0

表2 加劣化度と塗膜抵抗値比の関係

年	0	5	10	15	20	30	40	45	50	60	
$\beta$ ( $\Omega \text{ m}^2/\text{年}^2$ )	500	1.00	0.99	0.98	0.94	0.90	0.78	0.60	0.49	0.38	0.10
	1000	1.00	0.99	0.95	0.89	0.80	0.55	0.20	—	—	—
	5000	1.00	0.94	0.75	0.44	0.00	—	—	—	—	—

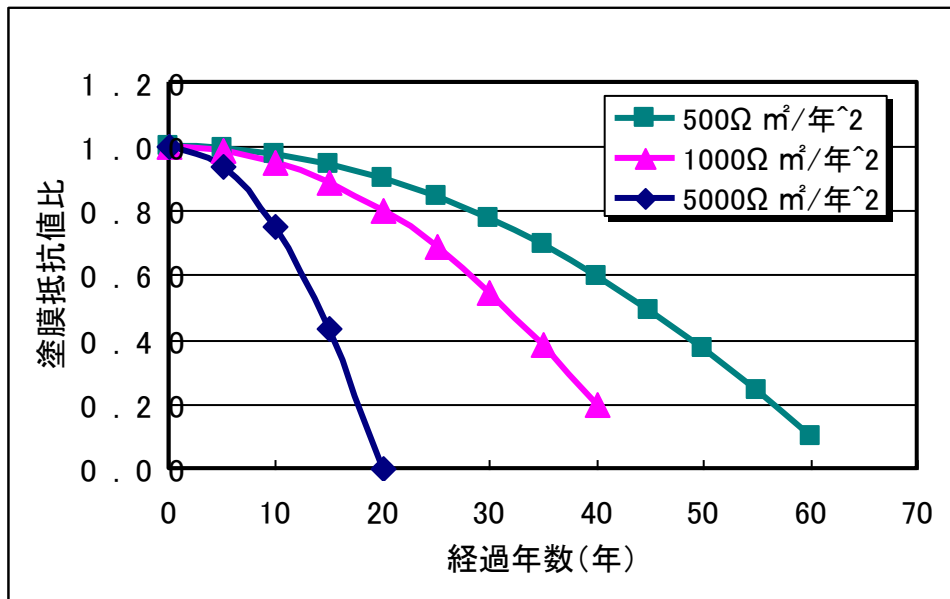


図3 加劣化度の値と被覆防食工の劣化曲線

#### 4. 2 加劣化度が塗膜抵抗値に比例する場合

次に、フィールドデータでは経験されている加劣化度が塗膜抵抗値に比例する様な場合、つまり加劣化度を塗膜抵抗値の関数と見做さねばならない場合について検討を加える。

この現象は、数学的には以下の様な2階線型同次微分方程式で表されることになる。

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} = -\gamma^2\omega \quad \dots\dots (8)$$

ここで、 $\gamma$ は加劣化度係数と定義するが、そのディメンションは年数の逆数である“1/年”となる。

この微分方程式は、解として虚根である $\pm i\gamma$ をもつため、

$$\omega \text{は } \omega = A\cos(\gamma t) + B\sin(\gamma t) \quad \dots\dots (9) \quad \text{となる。}$$

この解を変形すると、形はやや異なるものの、

$$\omega = A\cos(\gamma t + B) \quad \dots\dots (10) \quad \text{と表される。}$$

$$t=0 \text{ の時、 } \omega = \omega_0 \text{ であるから、 } \omega = A\cos B = \omega_0 \quad \dots\dots (11) \quad \text{となる。}$$

$$\text{また、 } \frac{d\omega}{dt} = -A\gamma \sin(\gamma t + B) \quad \dots\dots (12) \text{ であり、}$$

$$\text{この値は初期条件から } \frac{d\omega}{dt} = -A\gamma \sin B = 0 \quad \dots\dots (13) \quad \text{となる。}$$

これらの連立方程式(11)と(13)から、 $A = \omega_0$   $B = 0$  となる。

即ち、 $\omega = \omega_0 \cos(\gamma t)$  となり、初期塗膜抵抗値との比は  $\frac{\omega}{\omega_0} = \cos(\gamma t)$  と表される。

そこで、先に加劣化度が定数の場合に値を推定し実施した計算と同様な検討を行うことにする。 $\omega_0$ の値は同様に  $10^6 \Omega \text{ m}^2$ とし、 $1/\gamma$ の値は経験などに鑑み20、30および50年として検討する。

これまでに述べた検討方法に基づき計算した結果を整理し、加劣化度係数と塗膜抵抗値の関係として表3に記載する。 $\gamma$ の値の増加とともに、耐用年数が長くなる事が分かる。この現象は理論面からも当然の帰結と思われる。

これらの関係を基に描いてみた被覆防食工の劣化曲線を図4に示す。先の劣化曲線に比し、劣化度合いが緩和されていることが分かる。

表3 加劣化度係数と塗膜抵抗値比の関係

年	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
$\gamma$ (/年)	1/20	1.00	0.97	0.88	0.73	0.54	0.32	0.07	—	—	—
	1/30	1.00	0.99	0.94	0.88	0.79	0.67	0.54	0.39	0.24	0.07
	1/50	1.00	1.00	0.98	0.96	0.92	0.88	0.83	0.76	0.70	0.62

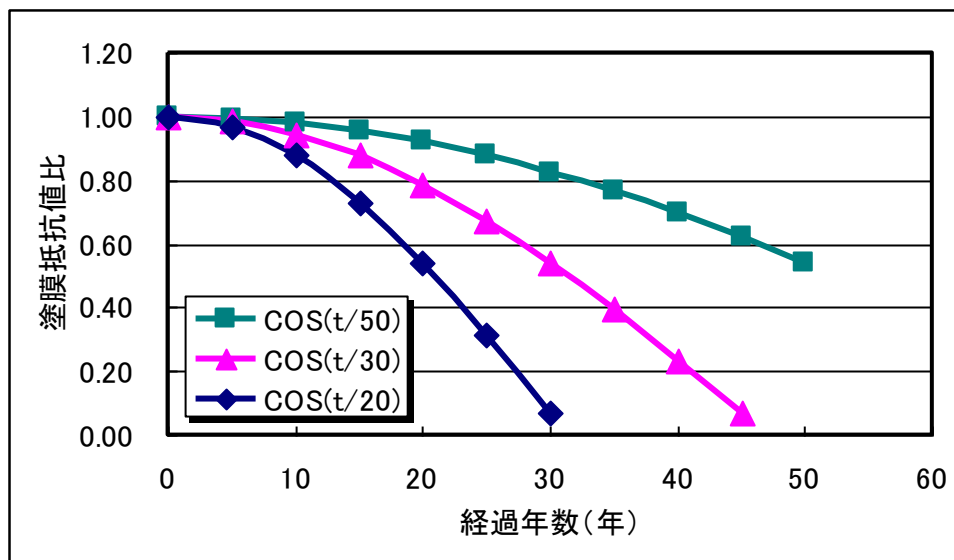


図4 加劣化度係数の値と被覆防食工の劣化曲線

## 5. まとめ

港湾鋼構造物に於ける被覆防食工の劣化曲線を推定するにあたり、塗膜抵抗値を劣化指標に選定し、数学的な考察を加え、微分方程式や劣化度および加劣化度などを適用してみた。その結果、被覆防食工の劣化曲線として放物線タイプと余弦関数タイプの劣化曲線が導出された。

この様に条件の単純化により得られた結果で全ての説明ができる等と云うつもりは無く、本論が1つの起爆剤となり、これまで定性的な取り扱いで済ませてきた劣化曲線に関心が高まり、関連技術者によるデータの解析や研究への積極的な参入や議論がなされるなら発表者にとり望外の喜びである。

これまで実務現場で蓄積されてきた膨大な数のデータの分析などにより、実態が解明され、定量性が加味された劣化曲線を適用した維持管理が実施される日が一日も早く来ることを期待しつつ結びとしたい。