港湾鋼構造物に於ける防食工の劣化度推定式の検討

防食・補修工法研究会　　柏木達夫

１．はじめに

厳しい腐食環境に曝される港湾鋼構造物を腐食被害から保護するため、下部工には施工性、耐久性、工期およびコストなどを勘案した被覆防食工法が適用され、且つ、設計供用期間を満たすだけの耐用年数が要求される。この重要な耐用年数を推定するためには、下部工に施された防食工の劣化度の経年変化値(今後は劣化曲線と記述する)を把握することが必要であり、これについては論を俟つまでもない。

被覆防食工の実フィールドに於ける劣化度測定は難しく、測定値の誤差も大きなため、実験値や経験値に基づき得られる想定劣化曲線により耐用年数を議論せざるを得ないのが現状である。しかし、精度や定量性に問題のある想定劣化曲線から算定した耐用年数では、誤った判定を下す懸念が大きいため、想定劣化曲線の改良が急務とされてきた。

そこで、劣化を反応速度と見做し、関係する反応因子を組み合わせ、実フィールド状況を反映した形の微分方程式を適用することにより定量性を加味した推定式を作成した。得られた劣化曲線を使い、耐用年数に関する検討・解析を実施したので詳細を報告する。

２．検討方法

２．１　劣化度および加劣化度

実フィールドに於ける被覆防食工の劣化は、防食材料の時間経過に伴う反応に応じて徐々に進展し、劣化減衰度合いにより劣化曲線の形状が決定される。

被覆防食工の劣化は、施工された環境に於ける温度(T)、圧力(P)、体積(V)および時間(t)などの独自な変化に影響される。被覆防食工の劣化を D という文字で表すことにすると、D は前述の因子の関数と見做すことができ、各々の因子の偏微分係数を用い、以下のように全微分方程式で示すことができる。

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

ところで、過去の実フィールドに於ける経験から D を律速するものは時間的因子に他ならないことが判明している。

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

そこで、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ことにすると、考えやすいが、D の指標に何を選ぶべきかといった悩ましい問題が生じることになる。

過去に於いて、被覆防食工の状態を反映する塗膜抵抗値や吸水率および膜厚値などが取り上げられてきた。しかし、実フィールドで実測できやすいものとの条件を付けると、使用実績が多く、信頼度も高いとされる塗膜抵抗値(ω)がベストと判定せざるを得ない。

防食･補修工法研究会　　〒104-0033 東京都中央区新川 2-5-2 新川エフビル
URL:http://bouhoken.com/　メールアドレス　oaktreechance@yahoo.co.jp

被覆防食工の劣化曲線を検討する際のポイントは、毎年の劣化度合いを把握することであるが、過去の経験からも毎年同じスピードで劣化はせず、年毎に増加すると判明している。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示す、ディメンションで表せば“Ω ㎡/年²”という値が必要となる。この値は劣化度の年変化率であり、劣化度である $d\omega/dt$ を再度微分した $d^2\omega/dt^2$ と表せる。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。

２．２ 微分方程式による劣化の定量式表現

これまでの経験に基づき被覆防食工の劣化定量式の検討を行った結果、加劣化度は塗膜抵抗値の変化に影響されることは勿論であるが、さらに劣化度因子の影響も考慮する必要があることが分かった。即ち、加劣化度は、劣化度および塗膜抵抗値の変分を加算したもので表すことにより、変化状況を十分に反映したものになると推察される。

そこで、より分かりやすく、実態を十分に反映すべき定量式を検討した結果、線型 2 階微分方程式の適用で解析できることが判明したので、以下に詳細を述べる。

３．検討結果と考察

３．１ 線型 2 階微分方程式による解析

加劣化度を塗膜抵抗値の変化および劣化度の和として考えると、2 因子の関係する加算式は以下のような微分方程式で表される。

$$\frac{d^2\omega}{dt^2}+A\frac{d\omega}{dt}+B\omega=0 \quad \cdot\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot (3)$$

このように表現される微分方程式を線型 2 階微分方程式と言い、それらの解に基づき劣化式を算定することにより、耐用年数を推定できる。$d\omega/dt=D$ とし、劣化度係数 A と加劣化度係数 B の条件により比較検討を行うと、**表 1** に示すような結果となる。

表１　微分方程式の条件と劣化式

条 件	微分方程式の解	A	B	劣化式
$D=A^2-4B>0$	$(A+\sqrt{D})/2\ (A-\sqrt{D})/2$	1/15	1/1200	$(3e^{t/60}-e^{t/20})/2$
$D=A^2-4B=0$	$A/2$	1/15	1/900	$e^{t/30}(1-t/30)$
$D=A^2-4B<0$	$(A+i\sqrt{D})/2\ (A-i\sqrt{D})/2$	1/15	1/800	$3e^{t/30}\cos(t/60\sqrt{2}+\alpha)$

① 実数根の場合

表 1 より劣化度係数 A は 1/15、加劣化度係数 B は 1/1200 であるから、

線型 2 階微分方程式は、$\dfrac{d^2\omega}{dt^2}-\dfrac{1}{15}\dfrac{d\omega}{dt}+\dfrac{1}{1200}\omega=0$ と表される。

この式に前述した D を適用すると、

方程式 $D^2-\dfrac{1}{15}D+\dfrac{1}{1200}=\left(D-\dfrac{1}{20}\right)\left(D-\dfrac{1}{60}\right)=0$ となり、

1/20 と 1/60 という解を得ることができる。

これらの解を念頭に置き、一般公式を適用すると、

劣化式は $\dfrac{\omega}{\omega_0}=\dfrac{3}{2}e^{t/60}-\dfrac{1}{2}e^{t/20}$ となる。

即ち、仮定条件のもとに組み立てた線型 2 階微分方程式を使い、推定劣化式が得られ、この式から劣化曲線を描くことができる。この劣化式を 0(ゼロ)と置くことにより、耐用年数 t は、$t=30\ell n3$ から 33 年と推察される。

そこで、劣化度係数 A と加劣化度係数 B の値を**表 2** のように変化させることにより、劣化曲線の違いを検討した。得られた劣化曲線を**図 1** に示す。

表 2　係数と耐用年数の関係

劣化度係数 A (/年)	1/5	1/10	1/15	1/20	1/25
加劣化度係数 B (/年 ^{2})	1/200	1/800	1/1200	1/2000	1/3000
耐用年数 t (年)	12.5	25	33	43.1	53

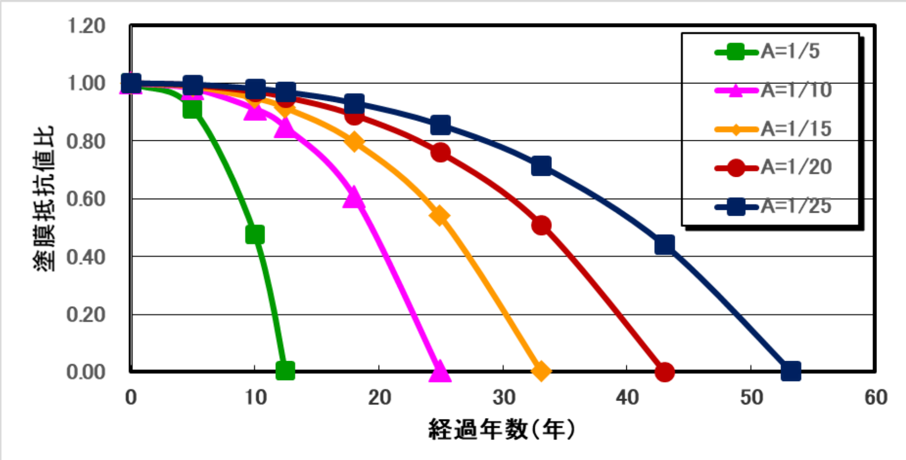

図 1　劣化度係数に応じた劣化曲線

② 重根の場合

実数根の場合と同様なプロセスを適用し、

方程式　$D^2-\dfrac{1}{15}D+\dfrac{1}{900}=\left(D-\dfrac{1}{30}\right)^2=0$　から 1/30 という解を得ることができ、

求める劣化式は $\dfrac{\omega}{\omega_0}=e^{t/30}\left(1-\dfrac{t}{30}\right)$ となり、耐用年数 t は、30 年と推察される。

そこで、劣化度係数 A と加劣化度係数 B の値を**表 3** のように変化させることにより、劣化曲線の違いを検討した。得られた劣化曲線を**図 2** に示す。

表 3　係数と耐用年数の関係

劣化度係数 A (/年)	1/5	1/10	1/15	1/20	1/25
加劣化度係数 B (/年 ^{2})	1/100	1/400	1/900	1/1600	1/2500
耐用年数 t (年)	10	20	30	40	50

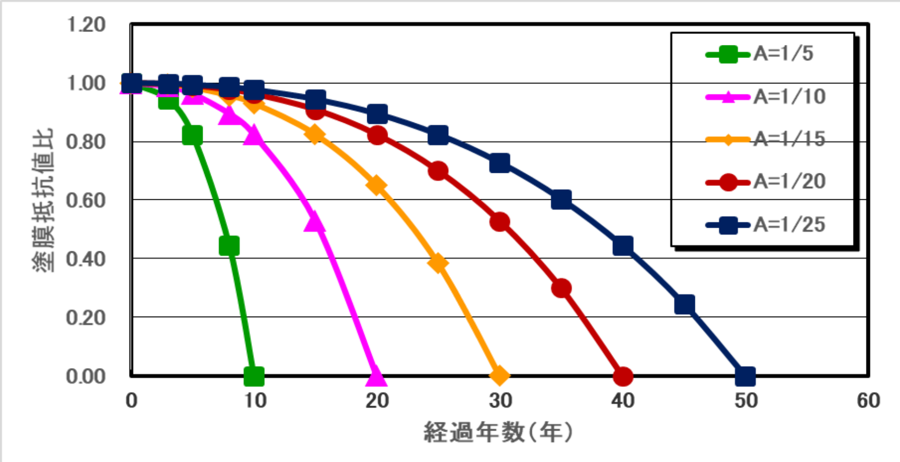

図２　劣化度係数に応じた劣化曲線

③ 虚数根の場合

前述と同様なプロセスを適用し、

方程式 $D^2-\dfrac{1}{15}D+\dfrac{1}{800}=\left(D-\dfrac{1}{30}-\dfrac{i}{60\sqrt{2}}\right)\left(D-\dfrac{1}{30}+\dfrac{i}{60\sqrt{2}}\right)=0$　から、

求める劣化式は $\dfrac{\omega}{\omega_0}=e^{t/30}(\cos(t/60\sqrt{2})-2\sqrt{2}\sin(t/60\sqrt{2}))$　となり、

耐用年数 t は、28 年と推察される。

そこで、劣化度係数 A と加劣化度係数 B の値を**表４**のように変化させることにより、劣化曲線の違いを検討した。得られた劣化曲線を**図３**に示す。

表４　係数と耐用年数の関係

劣化度係数 A (/年)	1/5	1/10	1/15	1/20	1/25
加劣化度係数 B (/年 ^{2})	1/50	1/200	1/500	1/800	1/1000
耐用年数 t (年)	8	16	25	31	36

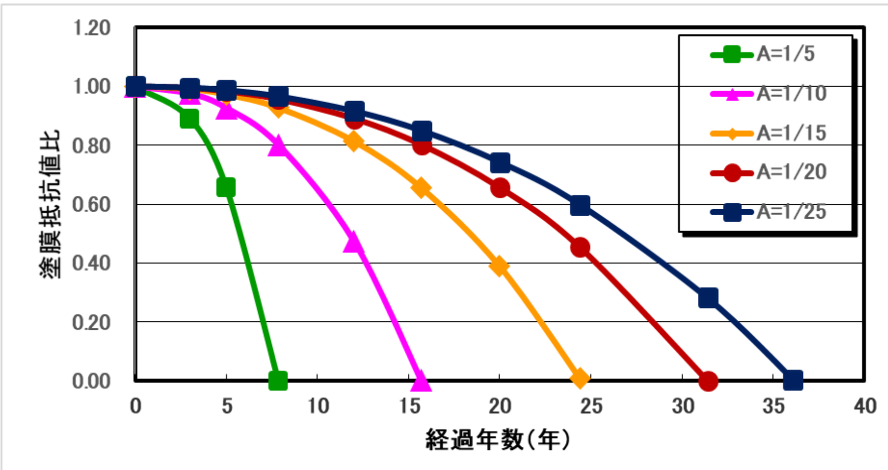

図３　劣化度係数に応じた劣化曲線

３．２ 耐用年数を決定する因子

劣化度係数 A と加劣化度係数 B の値が耐用年数におよぼす影響度を判別するため、一方の値を固定し、他方の値を変化させる方式を適用することで解析・検討を行った。

① 劣化度係数を一定とし加劣化度係数を変化させた場合

劣化度係数 A を 1/10 に固定し、加劣化度係数 B を 1/50 から 1/2000 まで変化させた結果により得られた耐用年数の値を**表５**と**図４**および**図５**に示す。

表５　加劣化度係数の変化と耐用年数の関係

A (/年)	1/10							
B (/年 ^{2})	1/50	1/100	1/150	1/200	1/300	1/500	1/1000	1/2000
t (年)	9	12	14	16	18	21.5	26.6	32.3

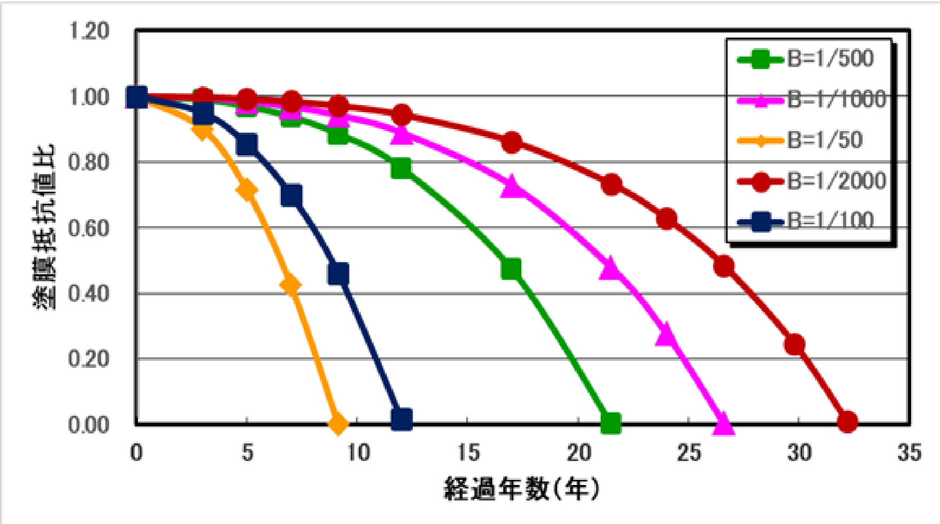

図４　加劣化度係数の変化に応じた劣化曲線

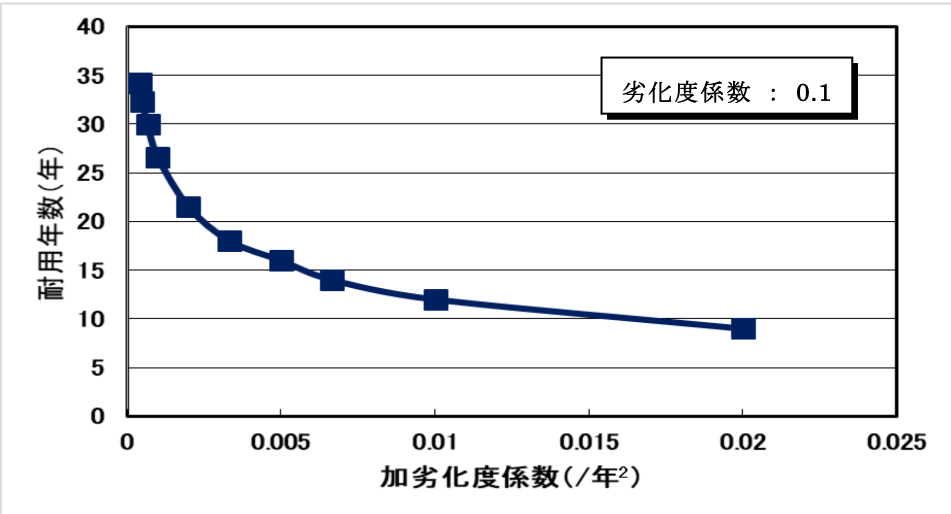

図５　加劣化度係数の変化に応じた耐用年数

② 加劣化度係数を一定とし劣化度係数を変化させた場合

加劣化度係数 B を 1/1000 に固定し、劣化度係数 A を 1/5 から 1/50 まで変化させた結果により得られた耐用年数の値を**表６**と**図６**および**図７**に示す。

表６　劣化度係数と耐用年数の関係

B (/年 ²)	1/1000							
A (/年)	1/5	1/10	1/15	1/20	1/25	1/30	1/40	1/50
t (年)	19.2	26.6	32.2	34	36.2	37.8	40.1	41.6

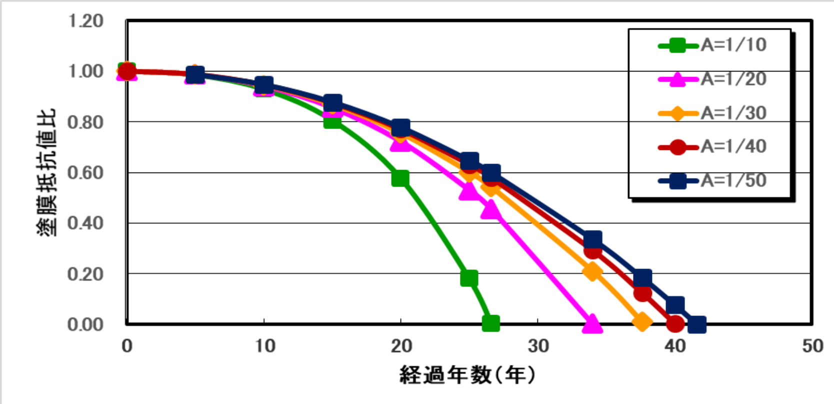

図６　劣化度係数の変化に応じた劣化曲線

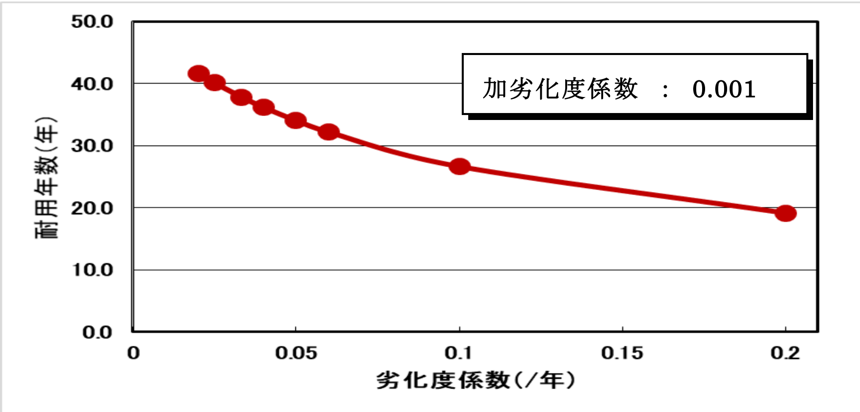

図７　劣化度係数の変化に応じた耐用年数

３．３ 解析・検討結果のまとめ

今般実施した解析・検討により得られた知見を以下にまとめた。

①線型 2 階微分方程式の 3 条件各々から求めた劣化曲線より得られた推定耐用年数は、得られた解が実数根の場合に最も長く、虚数根では最も短く、重根に於いては実数根と虚根二つの値の相加平均に近い値が示された。

②耐用年数は、加劣化度係数の変化に応じ放物線的な傾向を示し、劣化度係数の変化では直線に近い双曲線的な傾向を示すものとなった。

４．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とし、定義した劣化度と加劣化度を線型 2 階微分方程式に適用し、解析・検討を行った。その結果、所期の目的である定量性を加味した劣化曲線を得ることができた。

この様な条件の単純化・理想化により得られた結果のみ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のみで済まさざるを得なかっ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および議論がなされるような流れが生じるなら発表者にとり望外の喜びである。