

港湾鋼構造物に於ける防食工の

劣化度評価手法に関する再検討と一考察

防食・補修工法研究会 柏木達夫

1. はじめに

海洋という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、鋼構造物の下部工には施工性、耐久性およびコストなどを勘案した被覆防食工法が適用される。施工された防食工には、当然のこととして設計供用期間を満たすに足る耐用年数が要求される。この耐用年数を想定するためには、防食工の経年劣化の傾向(今後は想定劣化曲線と記述する)を把握することが必要不可欠であること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容易でなく、測定した値にも種々の誤差が伴うため、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想定せざるを得ないのが現状である。この点をクリアにするため、これまでも多くの先達が信頼度の大きな精度や定量性を有する想定劣化曲線の構築に努力を重ねてきた。

実フィールドで多くを学んだ筆者は、これまで微分方程式を用いた想定劣化曲線に基づく検討結果などを発表^{1~3)}してきたが、塗膜抵抗値の時間的な変化を間接的に評価したため隔靴搔痒の感を拭うことが出来なかった。そこで、塗膜抵抗の累乗値そのものに着目し、想定した時間変化式を用い累乗値により劣化度を検討した。以下に結果の詳細を報告する。

2. 検討方法

2. 1 塗膜抵抗の累乗値

実フィールドに於ける被覆防食工のデータより、初期塗膜抵抗値として $10^6 \Omega \text{ m}^2$ を適用することにした。初期累乗値 6 は時間経過に伴う劣化式を K とすると、**図 1** と **表 1** に記す 2 種類の変化が考えられるが、今後の検討には、より実際的な値である $6-K$ を適用する。

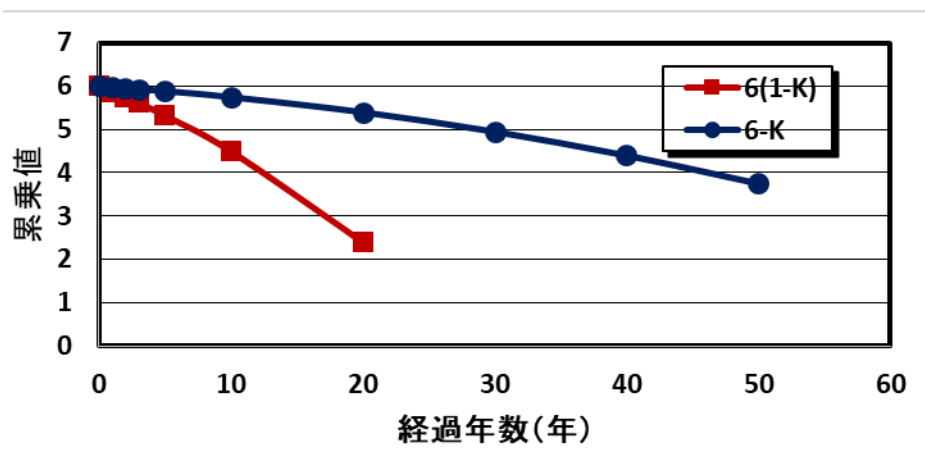


図 1 塗膜抵抗累乗値の経年変化

表 1 塗膜抵抗累乗値の経年変化

| 経過年数 t (年) | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
|--------------|----------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 累乗値 | $6(1-K)$ | 6 | 5.88 | 5.75 | 5.61 | 5.33 | 4.50 | 2.40 | — | — |
| | $6-K$ | 6 | 5.98 | 5.96 | 5.94 | 5.89 | 5.75 | 5.40 | 4.95 | 4.40 |

2. 2 累乗値の想定劣化式と劣化度係数・経過年数

これまでにフィールドで蓄積されたデータや経験則によれば、累乗値の経年変化は時間の累乗に影響されると推定される。累乗値を増やすほど精度が上がると思われるが、考慮すべき因子が複雑に絡んでくるため、解析が難しくなる。この点を考慮し、今回の検討に於ける累乗の値は1とした。また、この短所を補う意味で検討する想定劣化式の系列数を6種類として多面的な検討を実施した。表2に検討系列式をまとめて示す。

表 2 想定劣化式と劣化度係数および経過年数

| 想定劣化式 | | 劣化度係数 α (/年) | 経過年数 t (年) |
|-------|------------------------------------|----------------------|---------------------------|
| 系列1式 | $6-at$ | 1/20 1/30 1/50 1/100 | 1 2 3 5 10 20 30 40 50 |
| 系列2式 | $6-(1-\text{Cos}(at))$ | | |
| 系列3式 | $6-(1-e(-at))$ | | |
| 系列4式 | $6+(1-\text{Cosh}(at))$ | | |
| 系列5式 | $6-(1-e(-at))\times(1-at)$ | | |
| 系列6式 | $6-(1-e(-at))\times\text{Cos}(at)$ | | |

3. 検討結果と考察

3. 1 想定劣化式による塗膜抵抗の経年変化

6種類の想定劣化式の解析結果を以下に示す。尚、ページの都合上、想定劣化式の一部は表のみの記述とした。

① 系列1式 $6-at$

表 3 劣化度係数と経過年数の関係

| 経過年数 t (年) | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | |
|---------------------|-------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 劣化度係数 α (/年) | 1/20 | 6 | 5.95 | 5.90 | 5.85 | 5.75 | 5.50 | 5.00 | 4.50 | 4.00 | 3.50 |
| | 1/30 | 6 | 5.97 | 5.93 | 5.90 | 5.84 | 5.67 | 5.34 | 5.01 | 4.68 | 4.35 |
| | 1/50 | 6 | 5.98 | 5.96 | 5.94 | 5.90 | 5.80 | 5.60 | 5.40 | 5.20 | 5.00 |
| | 1/100 | 6 | 5.99 | 5.98 | 5.97 | 5.95 | 5.90 | 5.80 | 5.70 | 5.60 | 5.50 |

② 系列2式 $6-(1-\text{Cos}(at))$

表 4 劣化度係数と経過年数の関係

| 経過年数 t (年) | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | |
|---------------------|-------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 劣化度係数 α (/年) | 1/20 | 6 | 6.00 | 6.00 | 5.99 | 5.97 | 5.88 | 5.54 | 5.07 | 4.58 | 4.20 |
| | 1/30 | 6 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 5.99 | 5.95 | 5.79 | 5.55 | 5.25 | 4.92 |
| | 1/50 | 6 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 5.98 | 5.92 | 5.83 | 5.70 | 5.54 |
| | 1/100 | 6 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 5.98 | 5.96 | 5.92 | 5.88 |

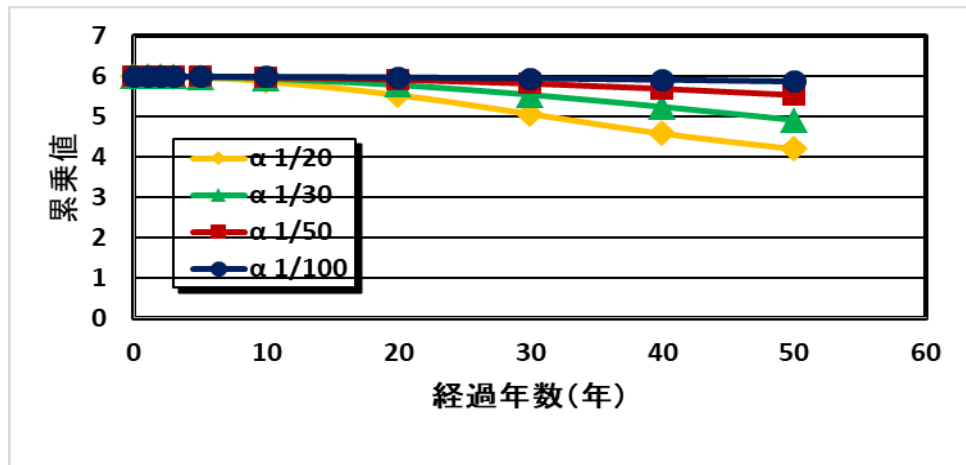


図2 劣化度係数に応じた累積値の経年変化

③ 系列3式 $6 - (1 - e^{-at})$

表5 劣化度係数と経過年数の関係

| 経過年数 t (年) | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | |
|----------------------------|-------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 劣化度 係数 α (/年) | 1/20 | 6 | 5.95 | 5.90 | 5.86 | 5.78 | 5.61 | 5.37 | 5.22 | 5.14 | 5.08 |
| | 1/30 | 6 | 5.97 | 5.94 | 5.91 | 5.85 | 5.72 | 5.52 | 5.37 | 5.27 | 5.19 |
| | 1/50 | 6 | 5.98 | 5.96 | 5.94 | 5.90 | 5.82 | 5.67 | 5.55 | 5.45 | 5.37 |
| | 1/100 | 6 | 5.99 | 5.98 | 5.97 | 5.95 | 5.90 | 5.82 | 5.74 | 5.67 | 5.61 |

④ 系列4式 $6 + (1 - \text{Cosh}(at))$

表6 劣化度係数と経過年数の関係

| 経過年数 t (年) | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | |
|----------------------------|-------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 劣化度 係数 α (/年) | 1/20 | 6 | 6.00 | 5.99 | 5.99 | 5.97 | 5.87 | 5.46 | 4.65 | 3.24 | 0.87 |
| | 1/30 | 6 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 5.99 | 5.95 | 5.77 | 5.47 | 4.99 | 4.30 |
| | 1/50 | 6 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 5.99 | 5.98 | 5.92 | 5.81 | 5.66 | 5.46 |
| | 1/100 | 6 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 5.99 | 5.98 | 5.95 | 5.92 | 5.87 |

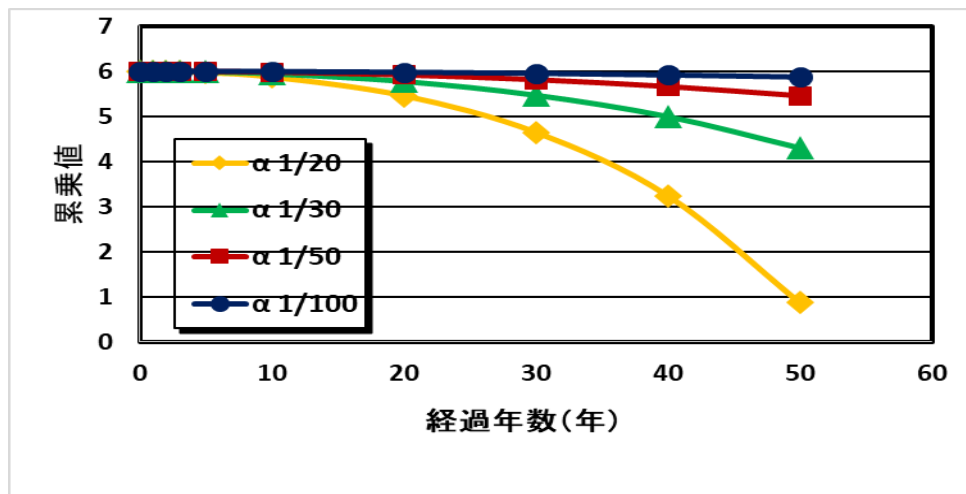


図3 劣化度係数に応じた累積値の経年変化

⑤ 系列 5 式 $6 - (1 - e^{-at}) \times (1 - at)$

表 7 劣化度係数と経過年数の関係

| 経過年数 t (年) | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | |
|----------------------------|-------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 劣化度 係数 α (/年) | 1/20 | 6 | 5.90 | 5.81 | 5.73 | 5.58 | 5.30 | 5.00 | 4.89 | 4.86 | 4.88 |
| | 1/30 | 6 | 5.94 | 5.87 | 5.82 | 5.71 | 5.48 | 5.18 | 5.00 | 4.91 | 4.88 |
| | 1/50 | 6 | 5.96 | 5.92 | 5.89 | 5.81 | 5.65 | 5.40 | 5.22 | 5.09 | 5.00 |
| | 1/100 | 6 | 5.98 | 5.96 | 5.94 | 5.90 | 5.81 | 5.65 | 5.52 | 5.40 | 5.30 |

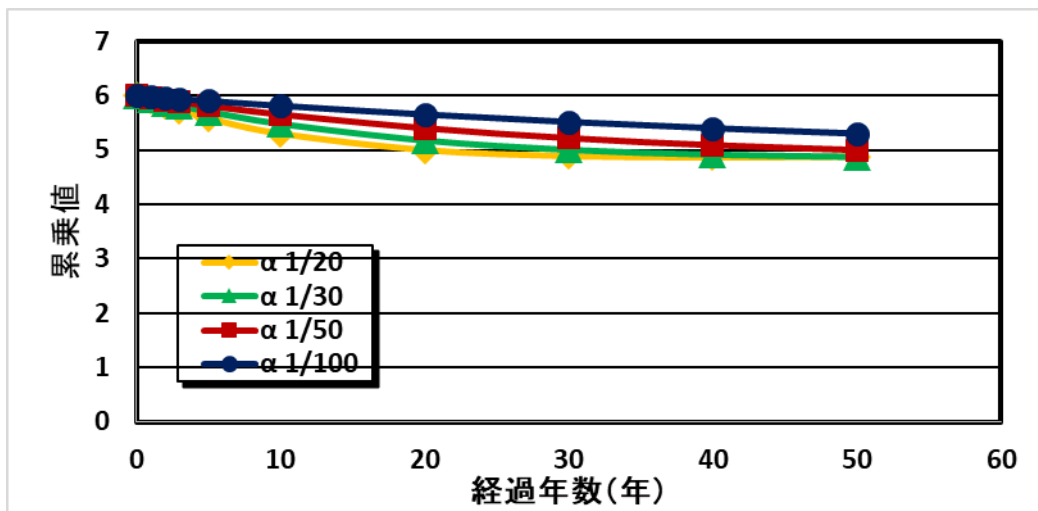


図 4 劣化度係数に応じた累乗値の経年変化

⑥ 系列 6 式 $6 - (1 - e^{-at}) \times \text{Cos}(at)$

表 8 劣化度係数と経過年数の関係

| 経過年数 t (年) | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | |
|----------------------------|-------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 劣化度 係数 α (/年) | 1/20 | 6 | 5.95 | 5.90 | 5.85 | 5.76 | 5.53 | 5.20 | 5.02 | 4.94 | 4.93 |
| | 1/30 | 6 | 5.97 | 5.93 | 5.90 | 5.84 | 5.68 | 5.41 | 5.20 | 5.07 | 4.99 |
| | 1/50 | 6 | 5.98 | 5.96 | 5.94 | 5.90 | 5.80 | 5.62 | 5.45 | 5.31 | 5.20 |
| | 1/100 | 6 | 5.99 | 5.98 | 5.97 | 5.95 | 5.90 | 5.80 | 5.71 | 5.62 | 5.53 |

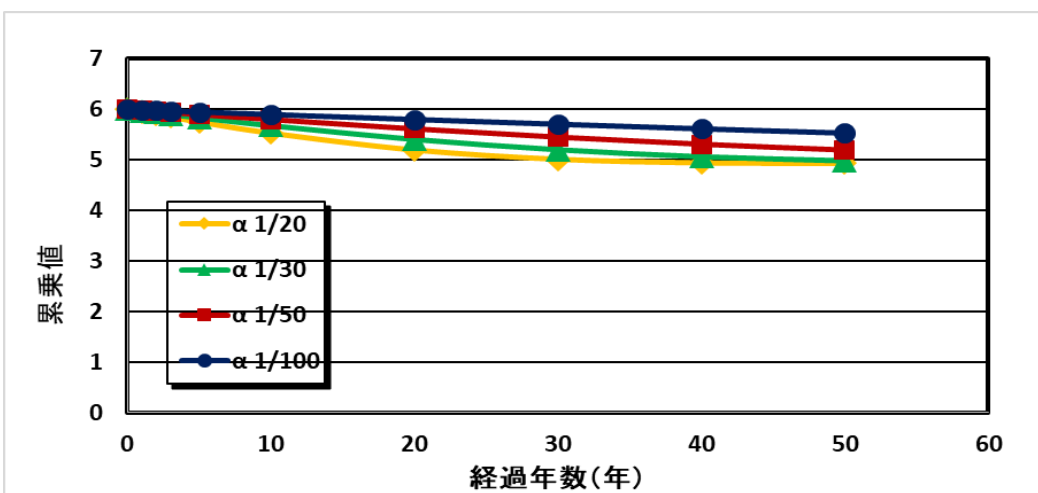


図 5 劣化度係数に応じた累乗値の経年変化

3. 2 耐用年数を決定する因子

耐用年数を決定する際の目安となる経年変化後の塗膜抵抗の値については明確な定義がないため、累乗値を考慮して一桁の減衰である 5 を耐用年数の判別値とした。

① 系列式夫々の劣化度係数を変えた場合

系列式毎に耐用年数が 50 年となる想定劣化曲線を整理した結果を表 9 と図 6 に示す。劣化度係数値は 1/20～1/50 と大きな差は見られず、経年途中の減衰度に多少の差がみられるものの、夫々の式に於ける 50 年経過後の累乗値は 5 に収束することが判明した。

表 9 劣化度係数と耐用年数の関係

| 経過年数 t (年) | | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 30 | 50 | |
|-----------------------|------|--------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 劣化度 係数 a (/年) | 1/50 | 系列 1 式 | 6 | 5.98 | 5.96 | 5.94 | 5.90 | 5.80 | 5.60 | 5.40 | 5.00 |
| | 1/32 | 系列 2 式 | 6 | 6.00 | 6.00 | 5.99 | 5.99 | 5.95 | 5.81 | 5.59 | 5.01 |
| | 1/20 | 系列 3 式 | 6 | 5.95 | 5.90 | 5.86 | 5.78 | 5.61 | 5.37 | 5.22 | 5.08 |
| | 1/38 | 系列 4 式 | 6 | 6.00 | 6.00 | 5.99 | 5.99 | 5.97 | 5.86 | 5.68 | 5.03 |
| | 1/50 | 系列 5 式 | 6 | 5.96 | 5.92 | 5.88 | 5.81 | 5.65 | 5.40 | 5.22 | 5.00 |
| | 1/40 | 系列 6 式 | 6 | 5.98 | 5.95 | 5.92 | 5.88 | 5.75 | 5.53 | 5.35 | 5.09 |

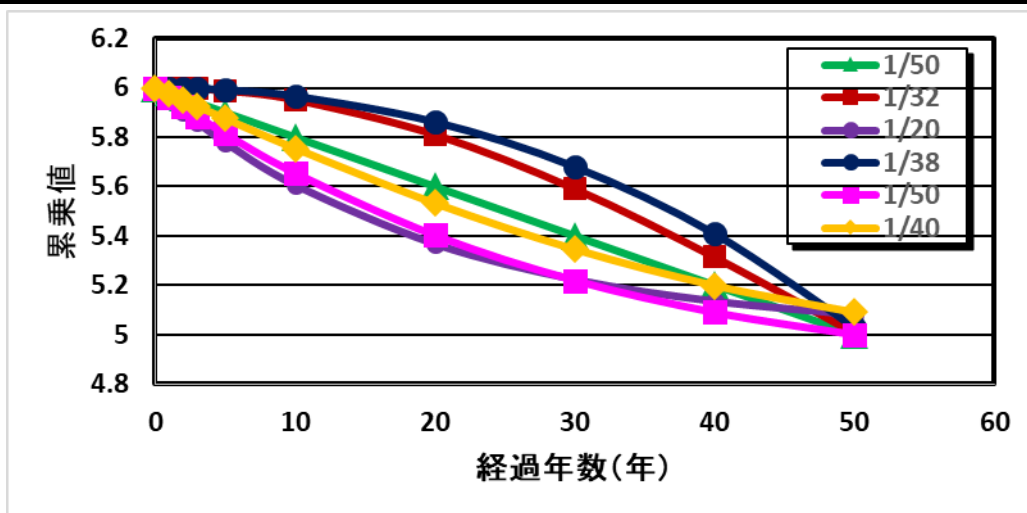


図 6 劣化度係数に応じた累乗値の耐用年数

② 系列式夫々の劣化度係数を一定とした場合

上記の結果に基づき劣化度係数の最小値である 1/50 を選定し、系列式夫々の累乗値の変化を整理した結果を表 10 と図 7 に示す。50 年後の値に多少のばらつきが生じているものの、累乗値 5 に収束することが判明した。

表 10 系列式に応じた累乗値の耐用年数

| 経過年数 t (年) | | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
|-------------------------|--------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 劣化度 係数 a 1/50 年 | 系列 1 式 | 6 | 5.98 | 5.96 | 5.94 | 5.90 | 5.80 | 5.60 | 5.40 | 5.20 | 5.00 |
| | 系列 2 式 | 6 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 5.98 | 5.92 | 5.83 | 5.70 | 5.54 |
| | 系列 3 式 | 6 | 5.98 | 5.96 | 5.94 | 5.90 | 5.82 | 5.67 | 5.55 | 5.45 | 5.37 |
| | 系列 4 式 | 6 | 6.00 | 6.00 | 6.00 | 5.99 | 5.98 | 5.92 | 5.81 | 5.66 | 5.46 |
| | 系列 5 式 | 6 | 5.96 | 5.92 | 5.89 | 5.81 | 5.65 | 5.40 | 5.22 | 5.09 | 5.00 |
| | 系列 6 式 | 6 | 5.98 | 5.96 | 5.94 | 5.90 | 5.80 | 5.62 | 5.45 | 5.31 | 5.20 |

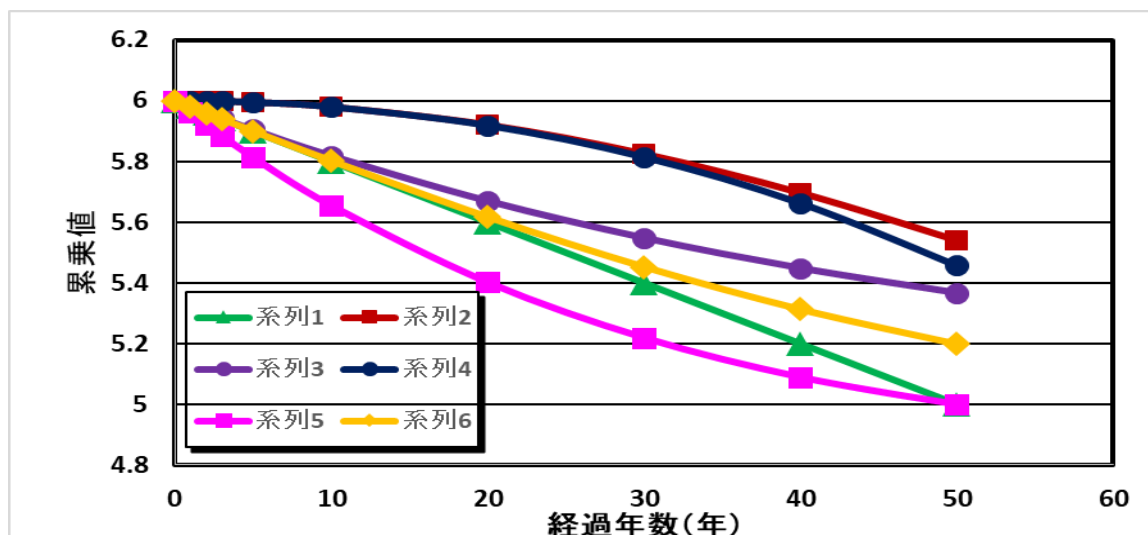


図7 系列式に応じた累乗値の耐用年数

3. 3 解析・検討結果のまとめ

今般実施した思考実験による解析・検討結果を以下に整理して示す。

- ①過去のデータや経験則に基づき6種類の劣化曲線式を想定し、塗膜抵抗値の累乗値の変化を検討した結果、想定劣化曲線式の夫々の劣化度係数の値が $1/20 \sim 1/50$ であれば、経年途中には多少の差がみられるものの、想定劣化曲線式に関わらず耐用年数は50年に収束することが判明した。
- ②想定劣化曲線式の経時変化には、放物減と自然対数減という二つの減衰傾向が見られるものの、適当な劣化度係数を選択することにより50年の耐用年数が期待できることが判明した。
- ③今回検討した想定劣化曲線式の違いが耐用年数に大きな影響を与えることはなく、ほぼ同じ値に収束するようであり、式より劣化度係数の影響度がより大きいと思われる。

4. まとめ

港湾鋼構造物に於ける被覆防食工の劣化曲線式を想定するにあたり、塗膜抵抗値の累乗値の変化に焦点を絞り検討した。ここで示した結果はあくまでも想定思考実験によるものであり、環境条件をより単純化・理想化したものにより得られた結果である。因って、実際の状況を正確に反映したものとは言わないが、今後さらに蓄積されるフィールドデータにより本検証が可能となる日が近い将来訪れることを祈念しつつ、本発表を締め括りたい。

引用文献

- 1) 柏木達夫: 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, 第34回防錆防食技術発表大会予稿集 No. 107
- 2) 柏木達夫: 港湾鋼構造物に於ける防食工の劣化度推定式の検討, 第38回防錆防食技術発表大会予稿集 No. 216
- 3) 柏木達夫: 港湾鋼構造物に於ける防食工の劣化度推定式の検討, 防錆管理, Vol. 62, No. 12, P. 29~34 (2018)