

論文

[1072] コンクリート構造物の耐用年数評価のための劣化予測式の検討と考察

正会員○桜井 宏 (北見工業大学工学部)  
 正会員 鮎田耕一 (北見工業大学工学部)  
 鈴木明人 (大成建設技術研究所)  
 正会員 佐伯 昇 (北海道大学工学部)

1.はじめに

1.1 背景

最近、コンクリート構造物のライフサイクルコストの算定方法や耐用年数の推定に関する関心が高まり、新設構造物の設計時点での耐久性評価をするための合理的で客観的な手法の確立が必要とされている。この手法は<sup>1)</sup>耐久性設計や残存寿命の推定の際に必要となるが、これを作成した際その中で用いられる劣化予測式の信頼性が問題となる。これを確認する方法としては、その手法を用いて評価するコンクリート構造物の追跡調査、既存構造物の調査データによるシミュレーション<sup>2)</sup>とその劣化度の比較、及びコンクリートの部材のモデル供試体を作成して促進試験を行うこと等が考えられる。また促進試験と並行してモデル供試体を実際の環境下で曝露し促進試験等により得られた劣化予測式の整合性や精度を評価することが必要である。

1.2 目的

本研究はコンクリート構造物の耐用年数評価のために室内実験及び既往の研究のデータを解析して得られた劣化予測式を<sup>5)</sup>曝露実験結果と<sup>6)</sup>比較しその精度を検討するとともにその信頼性を高めるための方法についての考察を行う。対象とする評価項目には寒冷地の海洋環境下で発生する表面劣化を取り上げた。

2.検討方法及び検討データ

2.1検討方法

2.1.1 検討の手順

コンクリート構造物の耐用年数評価のための劣化予測式の検討と考察の手順を図-1に示す。

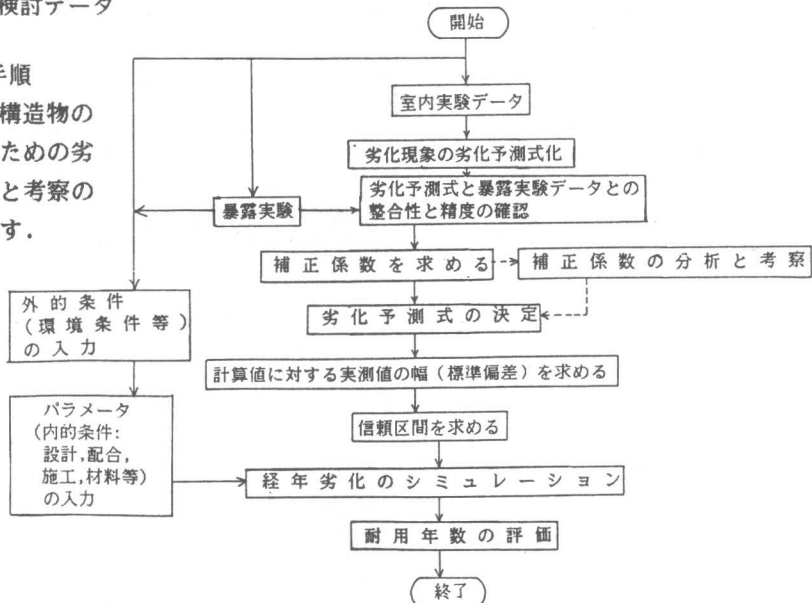


図-1 コンクリート構造物の耐用年数評価のための劣化予測式の検討のフロー

### 2.1.2 劣化予測式の精度確認のための解析方法

劣化予測式による計算値と実測値の関係より計算値の精度を確認し、計算値に対する実測値のとりうる幅を推定するため計算値をX、実測値をYとしてこれらの関係を示す点の散布図(図-3)を描く。実測値のとりうる幅が制御変数とする計算値の値によって変化すると仮定し、条件付分散の変動を考慮した回帰分析<sup>4)</sup>を行う。条件付分散の変動は以下の式で表される。

$$\text{Val}(Y | x) = \sigma^2 g^2(x) \text{-----}(1)$$

ただし、 $g(x)$ は以下のような式を仮定する。

$$g(x) = Cx \text{-----}(2)$$

また、 $C$ は線形回帰によって求める。 $\sigma$ は未知定数である。ここでも線形回帰式を用いると

$$E(Y | x) = \theta + \omega x \text{-----}(3)$$

分散が小さい領域つまり計算値が小さい領域のデータは分散の大きい領域のデータの点より大きな重みを持つと仮定する。このような根拠から分散に逆比例する重みを定める。すなわち、以下のような式で示される。

$$W_i' = \frac{1}{\text{Val}(Y | x_i)} = \frac{1}{\sigma^2 g^2(x_i)} \text{-----}(4)$$

したがって、二乗誤差は次のように表される。

$$\Delta^2 = \sum W_i' (y_i - \theta - \omega x_i)^2 \text{-----}(5)$$

これより、 $\omega$ の最小二乗推定値は次のように求められる。

$$\hat{\omega} = \frac{\sum w_i (\sum w_i y_i x_i) - (\sum w_i y_i)(\sum w_i x_i)}{\sum w_i (\sum w_i x_i^2) - (\sum w_i x_i)^2} \text{---}(6)$$

$$\hat{\theta} = \frac{\sum w_i y_i - \hat{\omega} \sum w_i x_i}{\sum w_i} \text{---}(7)$$

ただし、

$$w_i = \sigma^2 W_i' = \frac{1}{g^2(x_i)} \text{-----}(8)$$

$\sigma^2$ の不偏推定値は次式で与えられる。

$$s^2 = \frac{\sum w_i (y_i - \hat{\theta} - \hat{\omega} x_i)^2}{n-2} \text{-----}(9)$$

したがって条件付分散の推定値は次式で与えられ

$$s^2_{y|x} = s^2 g^2(x) \quad \text{----- (10)}$$

偏差は以下ようになる

$$s_{y|x} = sg(x) \quad \text{----- (11)}$$

### 2.2 検討データ

検討データは寒冷地海洋環境下の暴露実験による表面劣化の平均被害深さの実測値とその計算値である。環境条件から決まる外的条件と材料、配合設計及び施工等による内的条件を表-1にまとめた。表面劣化の劣化指標の平均被害深さの計算の際に他の劣化現象とは表-2に示す関係があるとし、表-3に示す劣化予測式であるW/C/55にかかる指数(n)を3として、図-2の係数を用いてその計算値を求める。なお暴露試験による実測値を表-4に示す。

表-1 環境条件から決まる外的要因と材料、配合、施工等の内的要因のデータ

| 外的要因             |                    | 内的要因    |     |    |   |    |         |     |    |    |    |         |     |    |   |    |  |    |  |
|------------------|--------------------|---------|-----|----|---|----|---------|-----|----|----|----|---------|-----|----|---|----|--|----|--|
| 年凍結融解回数(回)       | 海岸(汀線)からの距離(m)     | 供試体 No. | セ   | W  | 養 | 養  | 供試体 No. | セ   | W  | 養  | 養  | 供試体 No. | セ   | W  | 養 | 養  |  |    |  |
|                  |                    |         | メント | ／  | 生 | 生  |         | メント | ／  | 生  | 生  |         | メント | ／  | 生 | 生  |  |    |  |
|                  |                    | ト       |     | 条件 |   | 日数 |         | ト   |    | 条件 |    | 日数      |     | ト  |   | 条件 |  | 日数 |  |
| 59.4<br>(8年間の平均) | 30~50<br>(時期により変動) | 1       | N   | 55 | F | 5  | 6       | FB  | 55 | F  | 5  | 11      | BB  | 55 | F | 5  |  |    |  |
|                  |                    | 2       | N   | 55 | F | 14 | 7       | FB  | 55 | F  | 14 | 12      | BB  | 55 | F | 14 |  |    |  |
|                  |                    | 3       | N   | 45 | F | 5  | 8       | FB  | 45 | F  | 5  | 13      | BB  | 45 | F | 5  |  |    |  |
|                  |                    | 4       | N   | 45 | F | 14 | 9       | FB  | 45 | F  | 14 | 14      | BB  | 45 | F | 14 |  |    |  |
|                  |                    | 5       | FA  | 55 | F | 5  | 10      | FC  | 55 | F  | 5  |         |     |    |   |    |  |    |  |

N:普通ポルトランドセメント, FA:フライアッシュセメントA種, FB:フライアッシュセメントB種, FC:フライアッシュセメントC種, BB:高炉セメントB種

表-2 表面劣化現象(劣化指標)と他の劣化現象の関係

| 評価項目               | 劣化指標 |      |      |      |    |    |      |
|--------------------|------|------|------|------|----|----|------|
|                    | 中性化  | 鉄筋腐食 | ひびわれ | 強度低下 | 変形 | 凍害 | 表面劣化 |
| 表面劣化<br>(平均被害深さmm) |      |      |      |      |    | ■  | ○    |

注

○は他の劣化現象が要因として従属するもので、これ自身は換算できない。  
■は他の評価項目が劣化現象として従属するものでこれも劣化指標に換算する

表-3 表面劣化現象の劣化指標、要因、及び予測式

| 評価項目    | I. 選定された劣化指標 |            | II. 要因 ([ ]内は変数)                            |  |      |  | III. 経年後の劣化指標(耐久性)の算定方法  |
|---------|--------------|------------|---|--|------|--|--|
|         | 指標           | 現象         | 外的要因  |  | 内的要因 |  |  |
| 0. 表面劣化 | 平均被害深さH(mm)  | ①凍害による表面劣化 | t: 供用年数(年)<br>N: 年凍結融解回数<br>w: 海水の補給係数(0~1) | W/C: 水セメント比(%)<br>α: 剥離係数<br>fc: コンクリートの圧縮強度<br>K: 表層強度低減率 |      |  | $H = W \cdot \alpha \left( N \left( \frac{W/C}{55} \right)^n - (0.001195 K^2 \cdot f_c^2) \left( \frac{W/C}{55} \right)^n \right)$ |

表-4 暴露実験による実測値 (mm)

| 供試体 \ 経過年数 (年) | 2      | 3      | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|----------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| N 55 F 5 (1)   | 0.002  | 0.005  | 0.006 | 0.008 | 0.009 | 0.028 | 0.040 |
| N 55 F 5 (2)   | 0.003  | 0.008  | 0.009 | 0.012 | 0.014 | 0.016 | 0.034 |
| N 55 F 14      | 0.001  | 0.002  | 0.002 | 0.011 | 0.003 | 0.004 | 0.007 |
| N 45 F 5       | 0.001  | 0.005  | 0.005 | 0.003 | 0.005 | 0.010 | 0.014 |
| N 45 F 14      | 0.0002 | 0.0004 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.001 | 0.004 |
| FA 55 F 5      | 0.005  | 0.009  | 0.010 | 0.011 | 0.010 | 0.026 | 0.049 |
| FB 55 F 5      | 0.008  | 0.012  | 0.019 | 0.024 | 0.017 | 0.052 | 0.121 |
| FB 55 F 14     | 0.004  | 0.009  | 0.009 | 0.011 | 0.013 | 0.031 | 0.078 |
| FB 45 F 5      | 0.003  | 0.008  | 0.006 | 0.009 | 0.010 | 0.013 | 0.027 |
| FB 45 F 14     | 0.002  | 0.005  | 0.006 | 0.008 | 0.008 | 0.012 | 0.032 |
| FC 55 F 5      | 0.024  | 0.042  | 0.059 | 0.063 | 0.064 | 0.131 | 0.317 |
| BB 55 F 5      | 0.044  | 0.097  | 0.093 | 0.114 | 0.105 | 0.243 | 0.364 |
| BB 55 F 14     | 0.016  | 0.112  | 0.074 | 0.072 | 0.073 | 0.153 | 0.343 |
| BB 45 F 5      | 0.006  | 0.013  | 0.018 | 0.020 | 0.021 | 0.036 | 0.050 |
| BB 45 F 14     | 0.002  | 0.004  | 0.004 | 0.006 | 0.005 | 0.009 | 0.027 |

### 3. 検討結果及び考察

#### 3.1 検討結果

##### 3.1.1 計算値と実測値の関係

図-2に暴露実験のデータを用いて、かつ海水の補給係数(W)を0.1とし最小二乗法より求めた養生日数と剥離係数( $\alpha$ )の関係を示す。これによると養生日数が増加すると剥離係数が減少する傾向がある。また、剥離係数は標準養生5日の普通ポルトランドセメントを規準とすると高炉セメントB種は10.1倍、フライアッシュセメントB種は2.6倍であった。

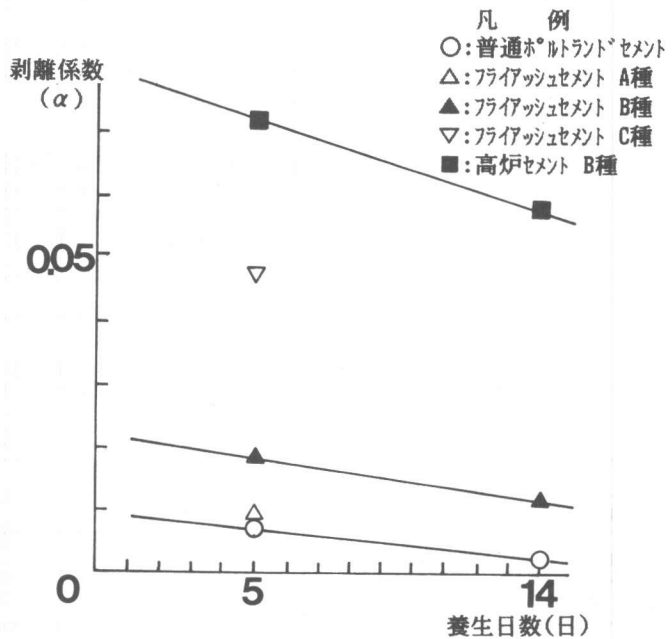


図-2 養生日数と剥離係数( $\alpha$ )の関係

図-3に計算値と実測値の関係を示す。これによると計算値が小さいとき実測値が大きい傾向があるが、これはポップアウトが発生しているためと考えられる。また計算値が比較的大きくなるとぼらつきが少なくなる傾向がある。

### 3.1.2 計算値の精度について

計算値の精度を確かめるため、計算値に対する実測値のとりうる範囲を、2.1.2に示した方法で計算した。まず、実測値と計算値の比を求めこれを補正係数(C)とする。この補正係数をかけた計算値(補正計算値:  $g(X)$ )と実測値の誤差の標準偏差を補正計算値で割った比(s)をとりこれらを表-5に示す。これによると、ぼらつきは補正計算値と実測値の誤差の標準偏差を補正計算値で割った比(S)では3.443であった。

### 3.2 考察

#### 3.2.1 経年劣化のシミュレーション

図-4、図-5に暴露供試体のFB55F5とFB45F5の要因を各々入力しシミュレーションした経年劣化である表面劣化の予測とその範囲を示す。補正計算値に対する実測値のとりうる範囲としての標準偏差と実測値の95%以内のものがとる範囲を示した。また暴露供試体の実測値を図中に示した。これによると、計算値と実測値の値はほぼ一致している。また表面劣化のシミュレーション結果によると図-4のように水セメント比が大きくなると図-5の水セメント比の小さいものに比べ平均被害深さの増加は著しく大きくなる傾向がある。

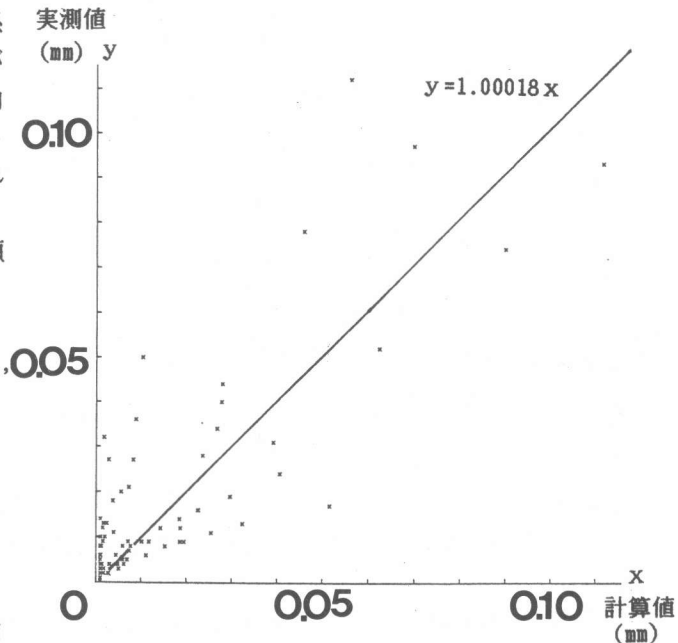


図-3 計算値と実測値の関係

表-5 計算値と実測値の比(C)と補正計算値と実測値の誤差の標準偏差と補正計算値の比(s)

| 実測値<br>計算値 | 標準偏差<br>補正計算値 |
|------------|---------------|
| 1.00018    | 3.44347       |

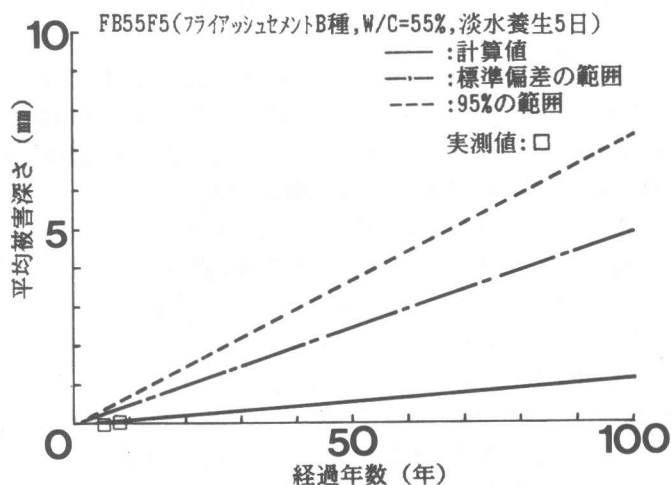


図-4 経年劣化(表面劣化)の予測とその範囲(水セメント比:55%)

### 3.2.2 劣化予測式の精度の向上について

表面劣化現象の劣化予測式の精度の向上するためには、今後さらに水セメント比等の配合を考慮し重回帰式等で関数形を検討するとともに既存構造物の調査によるデータ等でシミュレーションすることによりさらに詳細な予測精度の確認をすることが可能と考えられる。

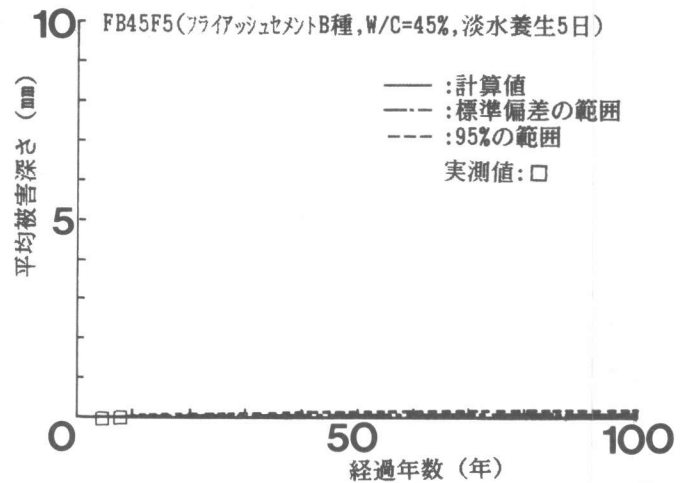


図-5 経年劣化(表面劣化)の予測とその範囲(水セメント比:45%)

### 4. まとめ

コンクリート構造物の耐用年数評価のための劣化予測式の検討と考察の結果、以下の事が明らかになった。

- (1)劣化予測式の精度確認のための解析方法として、制御変数とする計算値の値によって実測値のとりうる幅が変化すると仮定し、条件付分散の変動を考慮した回帰分析を行う事が有効である。かつ、この方法により実測値のとる標準偏差とその95%以内のものがとる範囲を示した経年劣化のシミュレーションが可能となる。
- (2)表面劣化現象の計算値と実測値の関係は全体的にはほぼ等しいが、ばらつきは補正計算値と実測値の誤差の標準偏差を補正計算値で割った比(S)では3.443であった。
- (3)表面劣化現象のシミュレーションの結果によると水セメント比が大きくなると平均被害深さの増加が大きくなる傾向があった。

本研究に際し、御指導を受けた北海道大学藤田嘉夫教授、北見工業大学林正道学長、御協力を受けた北見工業大学岡田技官、猪狩技官、北海道大学高田助手、及び大成建設技研の各位に感謝いたします。また測定等に際し、北見工業大学学生の木村、酒本君他多くの研究室の学生諸君の協力を得たことを付記し感謝いたします。

#### 参考資料

- 1)桜井宏, 青木俊彦, 百崎和博, 鈴木明人:コンクリート構造物の経年変化推定のためのデータの解析に関する検討及び考察, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp221-224, 1986
- 2)桜井宏, 鮎田耕一, 鈴木明人, 百崎和博, 佐伯昇, 藤田嘉夫:RC構造物の耐久性設計及び寿命予測のための経年変化データの解析及び検討, 「コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計」に関するシンポジウム発表予定, JCI, 1988年4月
- 3)桜井宏, 鮎田耕一, 佐伯昇, 岡田包儀, 藤田嘉夫:コンクリート構造物の耐久性評価のためのモデル化実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 1988, pp.591-596
- 4)Alfredo H-S.Ang, Wilson H.Tang:Probability Concepts in Engineering Planning and Design, John Wiley & Sons, Inc., 1975
- 5)桜井宏, 藤田嘉夫, 佐伯昇:海岸コンクリートの凍害による表面剝離被害の進行にについての二, 三の実験, 第36回土木学会年次学術講演会講演概要集, 1981, pp.327-328
- 6)桜井宏, 鮎田耕一, 佐伯昇:寒冷地海洋環境下に暴露されたコンクリートの表層部の劣化とその要因の検討, セメント技術年報41, 1987, pp.379-382