

# [56] 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

正会員○桜井 宏 (北見工業大学)  
 青木 俊彦 (大成建設技術研究所)  
 百崎 和博 (大成建設技術研究所)  
 鈴木 明人 (大成建設技術研究所)

## 1. はじめに

最近、コンクリート構造物のライフサイクルコスト(Life-cycle cost)の算定法や耐用年数の推定法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の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るようになった。

コンクリート構造物の耐久性評価手法は、目的により既存構造物の健全度評価手法と新設構造物の耐久性評価手法に分けられるが、本研究では、後者の特に新設構造物の設計時においての、耐久性の評価及び、経年変化推定のために必要なデータの解析と整理を行なう。

最近の研究の一つとして建設省の総合技術開発プロジェクト(以下総プロと略)がある。<sup>1)</sup>この研究では一つの目的として新設建築物の総合的耐久性向上技術の開発及び研究で耐久性判定基準の作成があげられている。現在、総プロの中で既存構造物の保全技術としての劣化度判定技術が出されている。<sup>2)</sup>一方建設材料の耐久性の評価に関する検討の手段についてはASTMのE-632<sup>3)</sup>で供用年数の予測のための材料の試験方法が示されている。これらを基に、新設構造物の耐久性判定技術の開発が行われるものと思われる。

## 2. 耐久性評価手法の検討

### 2.1 新設構造物の耐久性評価フローの検討

総プロの既存構造物の劣化度判定手法のフロー等を参考にして、新設構造物の経年後の劣化度の推定のためのフローを作成し、図-1に示した。このフローは、まず構造物の置かれている外的要因としての環境要因である劣化外力として、気温、湿度、海水からの距離、地下水の水質等を入力する。また、内的要因として、コンクリートの強度、及び応力度、鉄筋の強度及び応力度、そしてコンクリートの配合等(W/C、セメント種、単位水量、設定空気量、使用材料等)を設計値として入力する。さらに評価する新設時からの経過年数を入力する。次に劣化の各評価項目ごとに劣化の経年の劣化程度を算定し、各評価項目に関してグレーティングを行ない各々の劣化項目の性能による重みを考慮して総合劣化度の算定を行う。

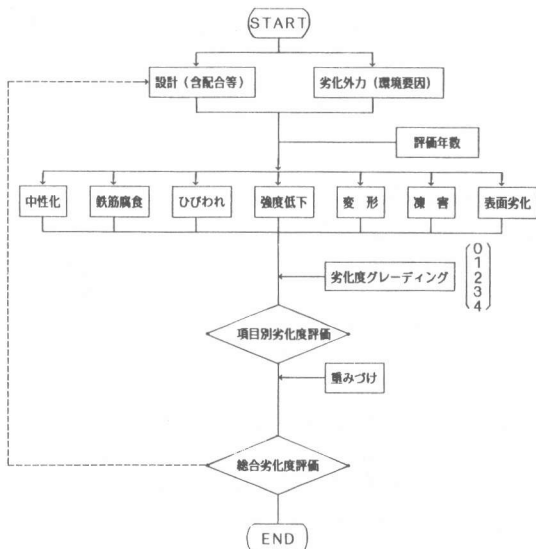


図-1 新設構造物の耐久性評価フロー

表-1 評価項目としての劣化の定義

評価項目	定義
③中性化	コンクリートが空気中の炭酸ガス、水中に存在する炭酸ソーダ等によりアルカリ性を失っていく劣化。(PH=10以下になる)
④鉄筋腐食	鉄筋がまわりのコンクリートの中性化やひびわれなどに伴う水分と酸素による酸化還元反応、塩分等の侵食性化学物質(CI <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )などによって発錆し、内部まで進行する劣化。
⑤ひびわれ	コンクリートの許容応力度以上の応力(主として引張強度以上の応力)が作用して生じるコンクリートの巨視的、部分的な破壊劣化。
④コンクリートの強度劣化	コンクリートが材料、使用環境、熱作用、化学作用によって強度が低下する劣化。
⑤変形	構造的な外力作用、乾燥収縮によって主として水平部材が大きく変形していく劣化(短期荷重は除く)
①凍害	コンクリート中の水分が、凍結融解を繰返し、強度低下を起こす劣化
④表面劣化	スケールンや、ポップアウト等によりコンクリート表面が欠損する劣化

## 2.2 耐久性の評価項目の選定

土木構造物の評価項目としては、中性化、鉄筋腐食、ひびわれ、強度低下、変形、凍害、表面劣化の7項目とし、その定義を表-2に示した。なお表面劣化は、土木構造物でも橋梁等があるので美観上必要でありかつ、これが激しければ鉄筋のかぶり厚さの減少につながるため項目に入れた。ただし各々の耐久性に関する評価項目の劣化現象は、実際には独立した現象でないが、ここでは独立したものとして扱う。

## 2.3 劣化指標の選定

劣化指標の選定に当たっては既往の実験研究結果より、指標自体が経時変化を定量的に表わすことが可能

表-2 評価項目ごとの劣化指標、要因、算定方法及びグレーディング一覧

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	IV. グレーディング		
	指標	現象			外的要因	内的要因
a. 中性化	① 中性化深さ X (mm)	① 中性化	t: 供用年数(年) W/C: 水セメント比(%) R: セメント種類 AF 剤種類 骨材種	W/C ≥ 60% のとき $x = 10 \times \sqrt{\frac{R^2 (0.01W/C - 0.25)^2}{0.3 (1.15 + 0.01W/C) t}}$ 4) W/C < 60% のとき $x = 10 \times \sqrt{\frac{R^2 (0.046W/C - 1.76)^2}{7.2 t}}$	0: x < 20 1: 20 ≤ x < 40 2: 40 ≤ x < 80 3: 80 ≤ x < 100 4: 100 ≤ x x: 中性化深さ (%) x: かぶり深さ	
b. 鉄筋腐食	① 充満面積率 P (%)	① 塩分の浸透による腐食	t: 供用年数(年) L: 海岸からの距離(m) Co: 飛来塩分量(wt%) Dc: コンクリートの拡散係数(cm <sup>2</sup> /s) D: かぶり深さ(mm) UC: 単位セメント量(kg/m <sup>3</sup> ) W/C: 水セメント比(%) γ: ワカビチの指標(1とする)	Co=0.48-0.07ln L (太平洋側)、Co=0.45-0.06ln L (北陸地方) C-Co(1- erf $\frac{D}{2\sqrt{Dc \cdot t}} \cdot 3.1536 \times 10^4$ ) 5) erfx = $\int_0^x \exp(-\mu^2) d\mu$ , μ=0.094t+0.245-0.029D 6) P=γ $\frac{2000}{UC} \cdot \frac{C}{2} \cdot (0.01W/C-0.3) \cdot 10^3$ 7)	0: P < 10 1: 10 ≤ P < 20 2: 20 ≤ P < 30 3: 30 ≤ P < 50 4: 50 ≤ P	
		② 中性化による腐食	D: かぶり深さ(mm) X: 中性化深さ(mm)	P = (1 - φ $(\frac{D-X}{0.41X})$ ) × 100 ここにφ(a): 正規分布関数	8)	
		③ ひびわれによる腐食	D: かぶり深さ(mm) Wmax: 最大ひびわれ幅(mm)	Wmean = $\frac{Wmax + 0.03}{1.91}$ 9) ここにWmean: 平均ひびわれ幅(mm) P = 0.167 $(\frac{Wmean}{D} \times 10^4 - 20)$ 10)	9) 10)	
c. ひびわれ	① 最大ひびわれ幅 Wmax (mm)	① 鉄筋の応力によるひびわれ	f <sub>s</sub> : 鉄筋の応力度(kgf/cm <sup>2</sup> ) D: かぶり深さ(mm) β: 注1) A: 注1)	Wmax = 0.0108 β · f <sub>s</sub> <sup>3/4</sup> / 10 × A × 10 <sup>3</sup> 11)	0: Wmax < 0.05 1: 0.05 ≤ Wmax < 0.2 2: 0.2 ≤ Wmax < 0.3 3: 0.3 ≤ Wmax < 0.5 4: 0.5 ≤ Wmax	
		② 乾燥収縮温度収縮によるひびわれ	TC: 温度変化幅 b: 断面の幅(m) h: 部材の全高(m) NH: 鉄筋の本数(本) fct: コンクリートの引張強度(kgf/cm <sup>2</sup> ) fb: コンクリートの鉄筋との平均付着強度(kgf/cm <sup>2</sup> ) φ: 鉄筋径(m) εcs: 乾燥収縮ひずみ εte: 温度収縮ひずみ	Wmax = $\frac{2b \cdot h \cdot fct}{\pi \cdot NH \cdot \phi \cdot fb} (\epsilon_{cs} + \epsilon_{te} - 100 \times 10^{-4}) \times 1000$ 12)		12)
		③ アルカリ骨材反応によるひびわれ	RG: 反応性骨材混合率(%) RU: セメントに対する骨材中のNa <sub>2</sub> O量(%)	反応性骨材混合率(RG)とセメントに対するNa <sub>2</sub> O量(%)より膨張係数(EX)を求める。		13)
d. 強度低下	① 圧縮強度比 SN (%)	① 硫酸塩の浸透による低下	t: 供用年数(年) S: 硫酸塩濃度(wt%) W/C: 水セメント比(%)	W/C=55%のみ 実験データを 自動回歸する $\begin{cases} H_2SO_4: 0.3\%, SN = -0.15t + 100 \\ H_2SO_4: 2.0\%, SN = -233.6t + 100 \\ H_2SO_4: 5.0\%, SN = -244.55t + 100 \end{cases}$ 14)	0: 95 < SN 1: 90 < SN ≤ 95 2: 80 < SN ≤ 90 3: 70 < SN ≤ 80 4: SN ≤ 70	
		② 凍害による低下	t: 供用年数(年) N: 年凍結融解回数 W/C: 水セメント比(%) AE or NonAE: AE剤の有無	f(①)のDNを強度に以下の式で換算 AE $\begin{cases} W/C-40\% SN = -0.04N \cdot t + 100 \\ W/C-50\% SN = -0.07N \cdot t + 100 \\ W/C-55\% SN = -0.11N \cdot t + 100 \\ W/C-60\% SN = -0.12N \cdot t + 100 \end{cases}$ 15) NonAE $\begin{cases} W/C-40\% SN = -0.49N \cdot t + 100 \\ W/C-60\% SN = -0.69N \cdot t + 100 \end{cases}$ 16)	15) 16)	
		③ アルカリ骨材反応による低下	RG: 反応性骨材混合率(%) RU: セメントに対する骨材中のNa <sub>2</sub> O量(%)	C③より膨張係EXを求めて SN=f(EX)を算出	17)	
e. 変形	① ひずみ ε (%)	① クリープひずみによる変形	σ: 荷重によるコンクリートの応力度(kgf/cm <sup>2</sup> ) (許容応力度内) φ: クリープ係数	$\epsilon = \frac{\sigma}{E_c} \cdot \psi$ (屋外であるためψ=2.0とする)	0: ε < 420 1: 420 ≤ ε < 670 2: 670 ≤ ε < 1033 3: 1033 ≤ ε < 2290 4: 2290 ≤ ε	
		② 乾燥収縮・温度収縮による変形	UC: 単位セメント量(kg/m <sup>3</sup> ) W/C: 水セメント比(%) TC: 温度変化幅	εcs = 0.00148W/C - 0.000301UC - 0.131 εte = 10 × 10 <sup>-4</sup> × TC 19)	19)	
f. 凍害	① 凍害による凍害率 DN (%)	t: 供用年数(年) N: 年凍結融解回数 W/C: 水セメント比(%) AE or NonAE: AE剤の有無	α: セメントの種類と養生条件によって決る係数 f <sub>c</sub> : コンクリートの圧縮強度 K: 表面強度低減率	実験データを自動回歸する AE $\begin{cases} W/C-40\% DN = -0.028N \cdot t + 100 \\ W/C-50\% DN = -0.053N \cdot t + 100 \\ W/C-55\% DN = -0.080N \cdot t + 100 \\ W/C-60\% DN = -0.085N \cdot t + 100 \end{cases}$ 15) NonAE $\begin{cases} W/C-40\% DN = -0.36N \cdot t + 100 \\ W/C-60\% DN = -0.51N \cdot t + 100 \end{cases}$ 16)	0: 96 < DN 1: 93 < DN ≤ 96 2: 85 < DN ≤ 93 3: 78 < DN ≤ 85 4: DN ≤ 78	
g. 表面劣化	① 平均被害深さH (mm)	t: 供用年数(年) N: 年凍結融解回数 W: 海水の補給係数(0~1)	W/C: 水セメント比(%) α: セメントの種類と養生条件によって決る係数 f <sub>c</sub> : コンクリートの圧縮強度 K: 表面強度低減率	H = W · α $(\frac{W/C}{55})^3 - (0.001195 k^2 \cdot f_c^2)^3 (\frac{W/C}{55})^3$ W=0.5とする。 α=0.0129	0: H < 1 1: 1 ≤ H < 2 2: 2 ≤ H < 3 3: 3 ≤ H < 4 4: 4 ≤ H	

注1) β: 中立軸と鉄筋の中心間の距離に対する中立軸と引張線との距離の比、はりでは約1.2  
A: 鉄筋と対称をなす引張側コンクリートの断面積(cm<sup>2</sup>)を鉄筋の数によって除したもの

注2) 長期材料による上昇分: (SN = -55.32 + 16.60ln(365t))  
(DN = -41.49 + 12.45ln(365t))  
を重ね合わせる。

表-3 評価項目（劣化指標）と劣化現象の関係

評価項目	劣化現象												
	中性化	鉄筋腐食	ひびわれ	強度低下	変形	凍害	表面劣化	乾燥収縮 温度収縮	アルカリ 骨材反応	クリープ ひずみ	塩分浸透	鉄筋の応力による ひびわれ	硫酸塩による浸透
中性化 (中性化深さ mm)	●												
鉄筋腐食 (発錆面積率 %)	■	○	■				△	△			●	△	
ひびわれ (ひびわれ幅 mm)			○				●	●				●	
強度低下 (圧縮強度比 %)				○			■		●				●
変形 (ひずみ %)					○				●				
凍害 (相対動弾性係数 変形率 %)							●						
表面劣化 (平均被害深さ mm)							■	○					

- 注(1) ●は劣化指標を変化させる劣化現象で、これを劣化指標に換算する  
 (2) ○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。  
 (3) ■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  
 (4) △は■の劣化現象に従属する劣化現象で、これ自身は換算しない

でかつ裏付けとなる実験データが多いこと、また実構造物での測定可否等を考慮した。各劣化の評価項目に対して劣化指標を表-2に示したように中性化深さ(mm)、発錆面積率(%)、ひびわれ幅(mm)、圧縮強度比(%)、ひずみ(%)、相対動弾性変化率(%)、平均被害深さ(mm)で表わした。

2.4 劣化指標による劣化の経時変化の定量化

劣化指標が複数の劣化現象によって変化する場合には劣化の進行を主な劣化現象別に表-2に示したように仮定し分類する。この分類した劣化現象ごとに劣化指標の経時変化を求める式またはデータを対応させた。ここで劣化の進行が一般式として提案されていない場合は、統計的に直線回帰等で解析及び整理を行った。これらの式で各劣化現象ごとの劣化指標の増分を求め表-3に示したように整理しその和を求め、各々の劣化項目での劣化指標の値とした。

表-4 実構造物の検討データ

ひびわれと変形については発生時期及び経時変化の算定のための条件設定が複雑であるため初期の段階で発生するものと仮定した。

2.5 劣化度のグレーディングの検討

劣化指標のとりうる最大の値を仮定してこれを比例等の配分をしてグレーディングを定め、表-2に示した。

2.6 総合劣化度の算出方法

総プロの劣化度算出式で評価項目を7項目とし卓越係数を2として式(1)により総合劣化度を算出する。

$$\text{総合劣化度} = \sqrt{\sum_{i=1}^7 (A_i)^2 \cdot \frac{\alpha_i}{100}} \quad \text{式(1)}$$

$A_i$  : 劣化現象の平均劣化度  
 $\alpha_i$  : 劣化現象での重み係数 ( $\sum_{i=1}^7 \alpha_i = 100$ )

3. 実構造物への適用性の検討

実構造物の劣化外力、設計値と調査時の経過年数を入力して計算し実際の経年劣化との適用性を検討する。表-4の実構造物(橋樑)の条件を入力して各評価項目の経年変化を算出し、図-2①~⑦に示す。なお初期に発生するひびわれC②は補修するも

要 因	配母: パラメータ (単位)	実構造物		要 因	配母: パラメータ (単位)	実構造物			
		残値 (A)	残値 (B)			残値 (A)	残値 (B)		
劣 外 力	t: 供用年数 (年)	18	24	材 質	M/C: 水セメント比 (%)	49.1	52.0		
	L: 海岸からの距離 (m)	1	1		LC: 単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	320	282		
	DQ: 飛来塩分量 (wt%)	1.3	0.33		LD: 単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	157	174		
	TC: 温度変化幅 (°C)	30.3	33.3		R: セメント種類				
	S: 接触水の硫酸塩濃度 (wt%)	—	—		AE: 反応性骨材含有率 (%)	0.6	0.6		
	N: 年凍結融解回数 (回)	5	5		中: セメントに対する骨材中のNa <sub>2</sub> O量 (%)	—	—		
	W: 海水の飽和係数	0.5	0.5		AE or NonAE: AE剤の有無	有	有		
	D: かぶり深さ (mm)	75	50		DC: コンクリートの気取係数 (cm/s)	1.6 x 10 <sup>-9</sup>	0.44 x 10 <sup>-9</sup>		
	FS: 鉄筋の応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	816	1400		α: セメントの種類と養生条件により決まる係数の指標 (γ=1)	0.0129	0.0129		
	O: コンクリートの応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	17.4	50.0		K: 表面腐食低減率	—	—		
内 設 計	B: 注1)	1.2	1.2	工 業	γ: ワークビリティの指標 (γ=1)	1.0	1.0		
	A: 注1)	260	62.5		調 査	X: 中性化深さ (mm)	19.0	15.1	
	B: 断面幅 (m)	0.80	0.50			結 果	P: 腐食面積率 (%)	約 70	約 65
	h: 部材の全高 (m)	1.30	0.60				ひびわれ等	かぶり 欠 落	かぶり 欠 落
	MR: 鉄筋の本数 (本)	4	4						
	φ: 鉄筋径 (mm)	0.029	0.019						
	fc: コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	271	344						
	fct: コンクリートの引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	*	*						
	fbc: コンクリートの鉄筋との平均付着強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	27.1	34.4						
	σ: の平均付着強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	54.0	68.9						
EC: ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	2.58 x 10 <sup>6</sup>	3.29 x 10 <sup>6</sup>							
φ: クリープ係数	2.0	2.0							

- 注1) B: 中立軸と鉄筋の中心間の距離に対する中立軸と引張線との距離の比、ほりでは約1.2  
 A: 鉄筋と対称をなす引張側コンクリートの断面積を鉄筋の数で除したもの  
 \*: コンクリートの圧縮強度より算定

表-5 要求される性能に対する評価項目の重みの仮定

構造物の性能	構造安全性	耐火性	重み係数 (α)
性能の重み	80 %	20 %	
中性化	4 %	7 %	5 %
鉄筋腐食	58 %	20 %	50 %
ひびわれ	8 %	20 %	10 %
強度低下	7 %	20 %	20 %
変形	4 %	7 %	5 %
凍害	3 %	13 %	5 %
表面劣化	3 %	13 %	5 %
計	100 %	100 %	100 %

のとして計算した。

これによると中性化深さ、鉄筋腐食とも算定値よりも実際にはかなり速く進行している。これは初期から入るひびわれの影響によるものと考えられる。

また構造物の性能を構造安全性と耐火性とし、各評価項目の重みづけを表-5のように仮定して総合劣化度の経年値を算出して図-2⑧に示した。

#### 4. 今後の課題

RC構造物の耐久性評価手法を開発する際、今後の課題として以下の研究が必要である。

- 1) 劣化のメカニズムの把握と要因の整理をし、FTA解析等を詳細に行なう。
- 2) グレーディングの根拠を明確にするため統計的な被害の発生率等を踏まえて検討しグレーディングを設定する。
- 3) 各種構造物の機能及び性能とその劣化形態を多数のケースで検討し、劣化の各評価項目の重みづけを行なう。
- 4) 各劣化の評価項目に関する精度の高い促進試験と暴露試験を組み合わせ多数の実験を行なう。

5) 総合劣化度を算出した構造物の経年における追跡調査を実施する。

今後、土木の分野でも耐久性評価手法開発のために組織的な研究が必要と考えられる。

#### 参考文献

- 1) 建築研究所：既存構造物の保全技術・新設建築物の耐久性向上技術の開発，建・委・報告，1984
- 2) 建築研究所：昭和60年度建築研究所春期研究会第2研究部発表聴講資料，1985
- 3) ANSI/ASTM：“Standard Recommended Practice for Developing Short-term Accelerated Tests.”
- 4) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島出版，
- 5) 櫻野紀元：建築等への海塩影響調査，あらか第三集，1985
- 6) 永野宏雄：塩分汚染コンクリート構造物の診断方法の提案，第7回 JCI年次講演会，1985
- 7) 武若耕司：オートクレーブ方法による鉄筋の腐食量の推定，第4回 JCI年次講演会，1982
- 8) 友沢史紀：中性化による問題，施工No. 229，1985
- 9) 谷内田昌熙：実橋のひびわれ及び鉄筋の腐食状況調査，第6回 JCI年次講演会，1984
- 10) 神山：コンクリートのひびわれと鉄筋腐食
- 11) ACI224委員会：ACI構造設計基準(ACI318-77)，ACI, 1977
- 12) BSI:BS5337 “The Structural use of concrete for retaining aqueous liquids.”，1976
- 13) 日本材料学会：アルカリ骨材反応に関するシンポジウム，1985
- 14) 池永博威：種類と濃度の異なる酸および塩の溶液に浸漬コンクリートの劣化，1976
- 15) 鮎田耕一：凍結融解抵抗性に与える骨材の影響について，土木学会北海道年次講演会，1976
- 16) 伊東茂富：新編コンクリート工学，森北出版
- 17) 山下裕章：反応骨材に関する基礎試験(その1)，土木学会年次講演会講演概要集
- 18) 土木学会：RC示方書，1980
- 19) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点'82, 1982
- 20) 桜井宏：凍害によるコンクリート表層部の進行度について，土木学会北海道年次講演会，1980

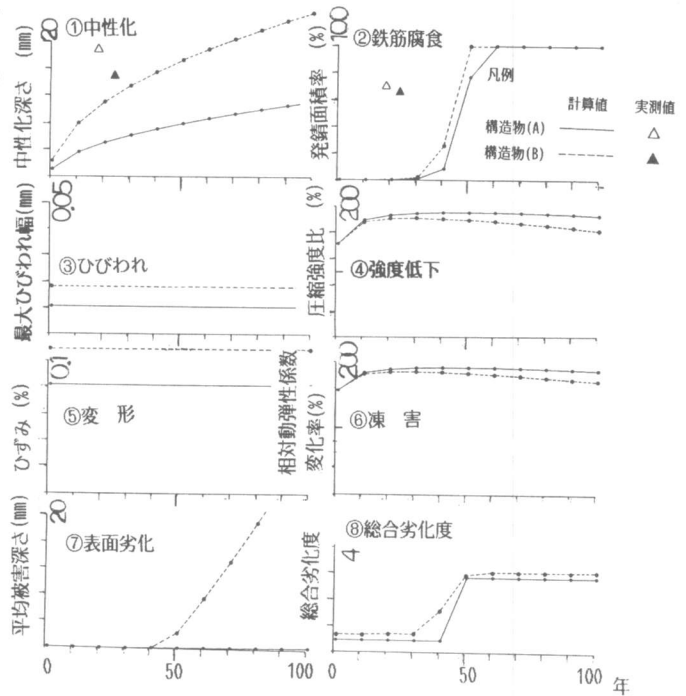


図-2 実構造物の経年変化の算定例