

コンクリート構造物のメンテナンスマネジメント手法の確立 (1)

——不確実情報下における検査情報の価値評価の試み——

Development of Maintenance Management System for Existing Concrete Structures (1)

— Evaluation of the Value for Inspection Technique under Uncertain Information —

加藤 佳孝*

Yoshitaka KATO

1. はじめに

膨大な社会資本ストックを抱える我が国においては、効率的に構造物の維持管理を行うことが必要不可欠である。特に、コンクリート構造物は社会資本ストックの多くを占めており、効果的な維持管理手法を構築することが急務であるが、未だ実行力のある手法の提案に至っていないのが現状である。これは、コンクリートが複合材料であること、施工時の全量検査が困難であること、様々な環境条件があること、などの要因により、構造物の劣化予測を精度良く行うことが難しいためであると考えられる。このように、コンクリート構造物の劣化予測は、設計時とは異なる不確実な情報下において実施することが多いため、いつ、どのような、補修・補強（あるいは更新）を実施することが適切であるかの判断が難しくなる。このような問題を解決するためには、実際の構造物の様々な情報を取得し、不確実情報を確実情報に変えていくことが有効な手段であると考えられ、その手段としては目視検査、非破壊検査、破壊検査などが考えられる。検査を実施することで、より正確な予測結果が期待できるが、維持管理しなければならぬ構造物が膨大にあるため、闇雲に行うことは得策ではないことは言うまでもない。あくまでも、我が国全体のストックを見据え、費用対効果を最大限にする検査を実施することが必要である。

本研究では、検査技術の活用により不確実情報を確実情報と変換した場合の効果、を、定量的に評価する手法の提案を行うものであり、後述する補修リスクにより定量評価を試みた。

2. 対象とする不確実性

本研究で対象とする劣化現象は塩害による鋼材腐食とする。これは、コンクリート構造物の劣化現象として代表的な現象であるとともに、現時点においてある程度の精度で劣化予測が可能であることによる。また、対象とする不確実性は①かぶりコンクリートの塩分の見かけの拡散係数、

②かぶり（厚さ）とした。実構造物を想定した場合、環境条件の不確実性は極めて重要な要因であるが、環境作用に関する既往の研究成果が少ないため、本研究では対象外とした。また、不確実性の予測において、塩分の浸透および鉄筋の腐食量の予測を既往の研究成果のモデルを活用して行うが、これらモデルの精度が不確実性に与える影響も多大であると考えられる。しかし、本研究では同一のモデルを活用し予測するため、その不確実性は相対比較の範囲内においては相殺されると考え、対象外としている。

3. 塩害劣化の予測モデル

塩害劣化は、かぶりコンクリート中に塩分が浸透し、コンクリート中の鋼材表面の塩分量がある値を超えたとき、鉄筋の腐食が開始し、最終的に腐食の膨張圧の作用により、かぶりコンクリートにひび割れ、剥落が生じる劣化である。本研究では、塩害劣化の予測モデルとして、塩分の浸透に関しては Fick の第 2 法則で表現し、鉄筋の腐食に関しては既往の研究成果¹⁾により表現することとした。具体的には、塩分の浸透に関しては、境界条件（表面塩分濃度）が一定のもとで拡散方程式を解いた理論式（式 (1)）で予測を行った。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_0 t}} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 C ：塩分量 (kg/cm^3)、 C_0 ：表面塩分量 (kg/cm^3)、 x ：表面からの距離 (cm)、 D_0 ：塩分の見かけの拡散係数 (cm^2/year)、 t ：時間 (year)、 erf ：誤差関数

鉄筋の腐食のモデル化は、鉄筋表面の塩分量が $1.2 (\text{kg}/\text{cm}^3)$ を超えたときから腐食が開始し²⁾、鉄筋の腐食速度を松村らの提案しているモデル¹⁾により予測し、鉄筋の腐食量が $10 (\text{mg}/\text{cm}^2)$ を超えたときに腐食ひび割れが発生する²⁾とした。腐食速度のモデルは、鉄筋の腐食速度がコンクリートの抵抗と密接な関係があることを活用しモデル化されている。

*東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

研究速報

$$\begin{aligned} \log V_{corr} &= 33.1(R_{RC}) + Y \quad (R_{RC} \leq 0.04) \\ \log V_{corr} &= 33.1 \times 0.04 + Y \quad (R_{RC} \geq 0.04) \\ Y &= 0.457 \cdot C - 9.79 \quad (C \leq 6.89 \text{ kg/cm}^3) \\ Y &= -6.64 \quad (C > 6.89 \text{ kg/cm}^3) \\ \log((R_c)_{L,H}) &= A + B_{L,H} \sqrt{t} \\ B_{L,H} &= -0.007744 + 0.0018 \times L + 0.00037 \times H \quad \dots (2) \end{aligned}$$

ここに、 V_{corr} ：腐食速度 (mg/cm²/year), R_{RC} ：コンクリートの抵抗の逆数 (1/Ω), C ：塩分量 (kg/cm³), A ：定数 (-1.216), L ：かぶり (cm), H ：相対湿度 (%), t ：時間 (year)

4. 不確実性の設定

本研究で対象とした不確実性は、かぶりと塩分の見かけの拡散係数であり、以下に各々のばらつきを既往の研究結果をベースに設定する。

4.1 かぶりのばらつきの設定

かぶりのばらつきは、基本的には施工誤差によるものであり、定量化することが極めて困難である。本研究では、既往の調査結果³⁾をもとにかぶりのばらつきを設定することとした。図1は、鉄道橋を対象としてかぶりを調査した結果をまとめたものであり、調査対象部材と施工誤差の平均値の関係を示している。グラフの縦軸のプラスはかぶりが設計かぶりを上回るもの、マイナスはかぶりが設計かぶりを下回るものを示している。なお、凡例の違いは、例えば柱側面の場合、数種類の柱を対象として柱1面の測定結果の平均に対して、最大値、平均値、最小値を示したものであり、最大値はかぶりが設計かぶりを最も上回っていることを、最小値はかぶりが設計かぶりを最も下回っていることを示している。平均値に関しては、概ね0~10mm程度の範囲に分布しているが、かぶりが設計かぶりを上回る場合は10~30mm、下回る場合は-20~0mm程度であることがわかる。図2は図1の結果の標準偏差を示している。

以上の測定結果を基に、施工に伴うかぶりの誤差を、「かぶりが設計かぶりと大きく異なる場合は、標準偏差も大きく異なる」という仮定のもと設定した。具体的には、各部材毎に「平均値の最大値+標準偏差の最大値」を求め平均したものを最大かぶり誤差、「平均値の最小値-標準偏差の最大値」を求め平均したものを最小かぶり誤差とした。

4.2 塩分の見かけの拡散係数のばらつきの設定

前田ら⁴⁾は、我が国で過去27年間に調査・報告された約1500組にのぼる海洋コンクリート中の塩化物イオン量調査データを、塩化物イオンの浸透過程の推定に有効活用できる資料とするために整理・分析している。図3は、この研究成果の一部であり、普通ポルトランドセメントを使

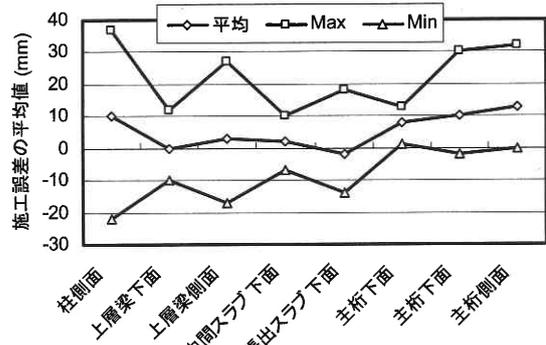


図1 施工誤差の平均値

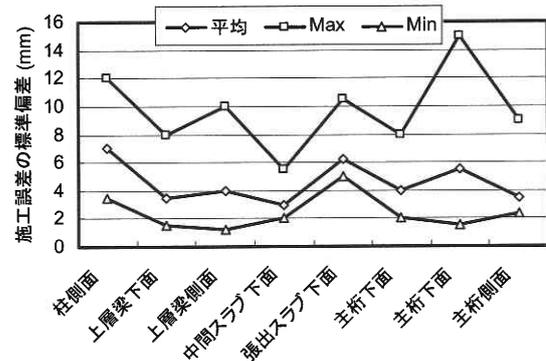


図2 施工誤差の標準偏差

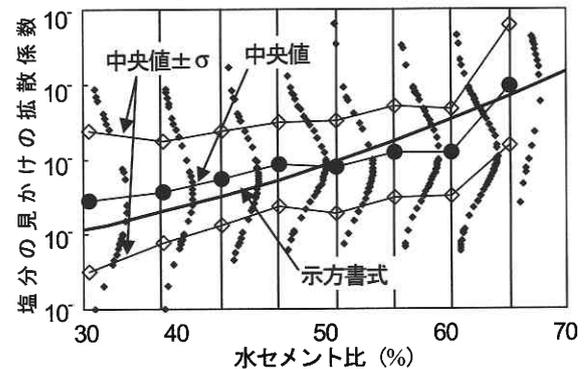


図3 塩分の見かけの拡散係数のばらつき⁴⁾

用した場合、塩分の見かけの拡散係数(以下、拡散係数)のばらつきを示している。本研究では、この既往の研究結果を活用し、拡散係数の平均および標準偏差を設定した。

5. 不確実情報下における検査情報の価値評価

5.1 不確実性を考慮した塩害劣化予測

塩害劣化予測は、3.の予測モデルをベースとして4.で設定したかぶりおよび拡散係数のばらつきを考慮して行う。なお、表面塩分量(式(1)中)は2.で記述したように、そのばらつきは考慮せずに一定値とし、鉄筋の腐食モデルに必要な相対湿度も一定値とした。予測結果の一

例を図4に示す。図4は鉄筋の腐食量の経時変化を示している。4.で設定した、かぶりおよび拡散係数のばらつきを基に、設計 $W/C = 0.5$ 、設計かぶり = 10 (cm)、 $C_0 = 13$ (kg/cm^3) の条件で腐食発生および腐食ひび割れ発生時期を予測した結果、腐食ひび割れ発生は最短で8年、最長で114年と予測された。最終的に得られた予測結果を確率密度分布で表したものが図5であり、設計かぶりは全て10 cm、 W/C と C_0 を変化させた場合の予測結果を示している。

5.2 補修リスクの算定

本研究では、予測結果のばらつきを補修（維持管理）リスクと捉え、予測結果の確率密度と補修費用および補修工法の有効期間から、「補修リスク」を以下の手順および条件により定量化した。

- ・補修工法：脱塩処理（費用 = 1, 有効期間 = 20 (年)⁵⁾
- ・予定供用年数 = 100 年
- ・100 年を超えるまで脱塩処理を繰り返す
- ・定期点検は5年ごと実施
- ・補修リスクは、脱塩処理の繰り返し回数 × 費用 × 確率密度 × 換算係数とし、5年ごと（定期点検）に計算し、残存供用年数分の総和により表現できるものとする
- ・換算係数は、求めた確率密度の平均値における値が“1”となるように変換する値である

例えば、同じ平均値（50）を持ち標準偏差が10と2の場合を想定する。換算係数を用いない場合の補修リスクは、それぞれ、0.58, 0.65 と計算され、ばらつきの評価の観点からすれば、標準偏差が2の場合が優れているにもかかわらず、逆の結果となっていることがわかる。これは、ひび割れ発生時期が遅いほど補修に要する費用が少なくてすむため、ひび割れ発生時期が遅い結果を持つ場合、すなわち標準偏差が大きい場合の方が補修リスクの総和が小さくなってしまふことによる。そこで、平均値における補修リスクはいずれの標準偏差においても同一のコストを要し、標準偏差の大きさにより補修リスクが変動するように換算係数を設定した。前述したように、ここでは、不確実性を定量的に評価することを目的としているため、このような手法を用いている。

図6は、上記の手順および条件の下計算した補修リスク分布を、図7は、残存補修リスクを示している。残存補修リスクとは、補修リスク分布の残存予定供用年数分の総和を示しており、例えば、供用20年において、補修リスクを評価する場合には、残りの25～100年の間の補修リスク分布の総和を用いて行うこととなる。

5.3 検査情報の価値評価

前節の補修リスクを用いて、検査結果によりかぶりあるいは拡散係数が明らかとなった場合の価値評価を試みる。

図8は、拡散係数が確定した場合（上図）、およびかぶりが確定した場合（下図）の残存補修リスクを示している。

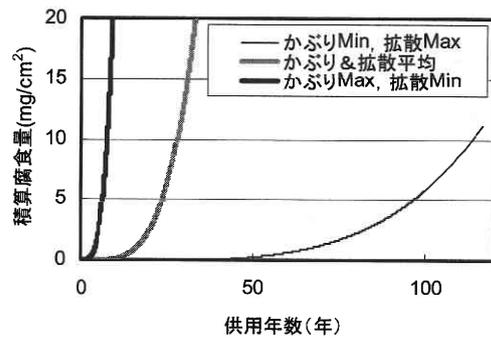


図4 鉄筋腐食量の経時変化

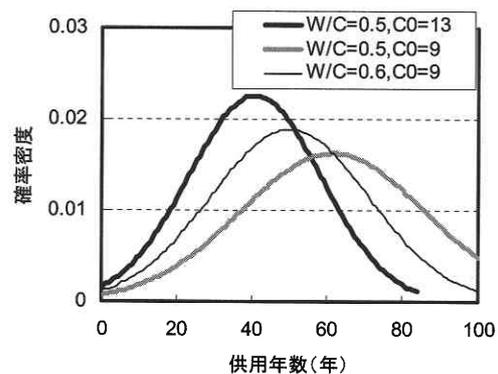


図5 腐食ひび割れ発生時期の確率密度分布

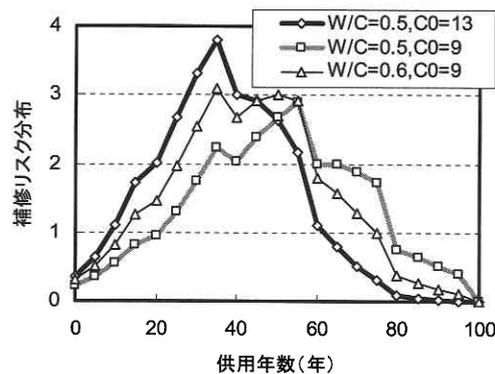


図6 補修リスク分布

今回の試算では、拡散係数のばらつきが予測結果に与える影響が大きいため、拡散係数を確定の方が補修リスクを大きく低減することが可能であることがわかる。

図9は、図7の結果から図8の結果を差し引いた値を「検査情報の価値」と定義し、算出した結果である。これによると、供用年数10年では拡散係数を確定することの効果は、 $W/C = 0.6, C_0 = 9 > W/C = 0.5, C_0 = 13 > W/C = 0.5, C_0 = 9$ であるのに対して、供用20年では、 $W/C = 0.6, C_0 = 9 > W/C = 0.5, C_0 = 9 > W/C = 0.5, C_0 = 13$ と、その順位が入れ替わることがわかる。これは、劣化が早いと考えられる $W/C = 0.5, C_0 = 13$ の場合、ある程度の供用期

研 究 速 報

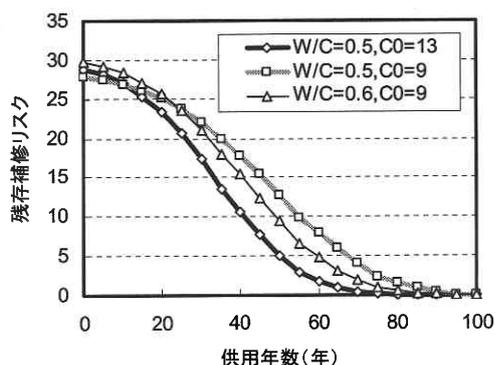


図7 残存補修リスク

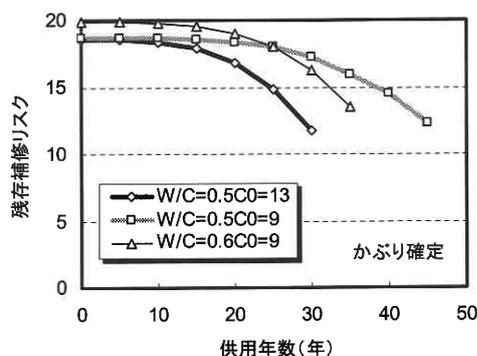
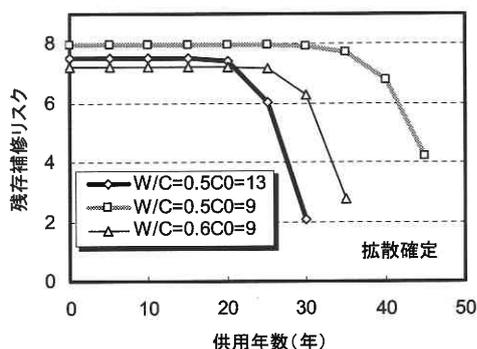


図8 確実情報下での残存補修リスク

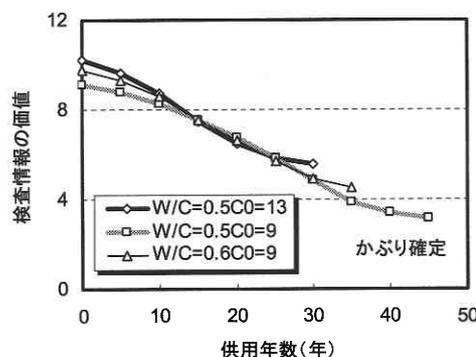
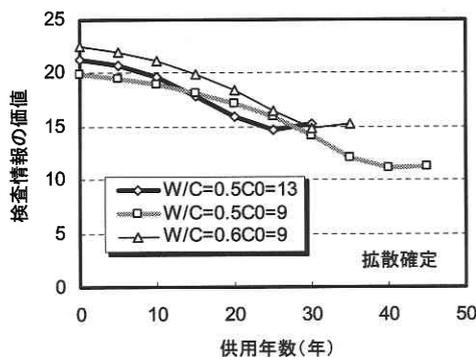


図9 検査情報の価値評価結果

間を過ぎると、数年後に腐食ひび割れが発生する可能性が高まり、検査によって不確実情報を確実情報に変換する効果が低減することによって考えられる。これは、あくまでも腐食ひび割れの発生を許容している維持管理計画における結果であるが、通常劣化の厳しいものから検査を実施するということが、必ずしも効果的ではないことを示している。

6. おわりに

本研究は、検査技術の活用により不確実情報を確実情報へと変換した場合の効果を、補修リスクにより定量化し評価する手法の提案を行った。これにより、従来、劣化の厳しいものから検査を実施するということが、必ずしも効果

的ではない場合があるということが明らかとなった。なお、今回のケーススタディは限られた条件下での結果であり、必ずしも現実の状況を想定したものではない。今後は、検査情報の価値のコスト評価への拡張、最適補修工法の選定を考慮した評価への拡張など、より現実的な評価が可能となる手法の提案を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は、21世紀COE（都市空間の持続再生学の創出）若手奨励研究費により実施しものであり、ここに記して感謝の意を表す。

(2003年11月25日受理)

参 考 文 献

- 1) 松村, 金津, 西内: 海岸近くの大気中に位置するコンクリート構造物の鉄筋腐食進行評価手法, 土木学会論文集, No. 634/V-45, pp. 303-314, 1999
- 2) 2002年制定コンクリート標準示方書施工編, 土木学会
- 3) 谷村, 長谷川, 曾我部, 佐藤: 鉄道高架橋におけるかぶりの施工誤差に関する調査研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 2, pp. 1843-1848, 2003
- 4) 前田, 武若, 山口, 好本: コンクリート中への塩化物浸透過程に関する既往調査の整理と分析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, 2002
- 5) コンクリート標準示方書 [維持管理編] に準拠した維持管理マニュアル, コンクリート技術シリーズ 57, 2003