

気象及び配合条件の地域特性を考慮したコンクリート構造物の 劣化ポテンシャル評価システムの開発

Assessment System for the Deterioration of Concrete Structures Using the Mix Proportion and Regional Meteorological Data

永田 茂 村山 八洲雄 須田 久美子
溝淵 利明¹⁾ 増川 淳二 林 大介
平山 泰典²⁾ 有馬 祐介²⁾

要 約

広域的に設置された多数のコンクリート構造物の劣化評価では、個々の構造物の材料特性及び施工条件の影響などに加え、コンクリートの経年劣化に影響を与える気象条件、土壌・大気環境、コンクリート材料・配合に関する歴史的な背景及び地域特性を考慮することが重要であり、これらを満足する劣化評価結果を用いることにより計画的かつ客観的な維持管理を遂行することが可能になる。本報告は、コンクリートの経年劣化に関する既往の知見を集約し、日本全国の気象条件とコンクリート配合の地域的な違いを考慮したコンクリート構造物の塩害、中性化、凍害に関する効率的な定量的評価を目的として開発したコンピュータ・システムについて紹介したものである。

目 次

- I. はじめに
- II. 劣化ポテンシャル評価システムの概要
- III. 事例解析
- IV. おわりに

I. はじめに

広域に設置された多数のコンクリート構造物の計画的かつ最適な維持管理を行うためには、劣化評価・予測結果は必要不可欠の情報であり、容易に劣化評価を行うことのできるツールの開発が望まれている。一方、広域の劣化評価では、対象構造物の立地する地域の気象条件やコンクリート配合などの違いを踏まえた評価を行うことが重要であり、このことが広域を対象とした劣化評価方法や具体的なツールの開発を困難なものにしてきた。

しかしながら、今日までにコンクリートの劣化評価モデルの研究¹⁾に加え、セメント協会「耐久性を阻害する要因マップ」のように日本全国の劣化に影響を与えると考えられる気象条件を抽出して地図に整理した研究²⁾や、日本全国を対象として中性化、塩害、凍害と気象条件の関係をマクロ的なグレーディングとして地図にまとめた研究^{3)~5)}など有意義な情報が多数報告されており、広域を対象とした劣化評価方法やそのシステム化が可能になりつつある。

本報告は、既往の劣化評価モデルに関する知見を超えるものではないが、個々の研究成果を組合せることにより、気象条件及びコンクリート配合に関して可能な限り多くの知見を取り込んだ広域劣化評価方法とこの方法を取り入れた劣化ポテンシャル評価システムを構築したので、その概要を報告するものである。

II. 劣化ポテンシャル評価システムの概要

1. 概 要

劣化ポテンシャル評価システム(以下、システムと呼ぶ)は、パーソナルコンピュータ用のソフトウェアであり、対象地点と対象コンクリート構造物の評価条件を入力することにより気象条件と配合条件を抽出し、これを用いて構造物ごとの塩害、中性化、凍害の現状評価と将来予測、ライフサイクル全般における最適な維持補修計画と費用の概略評価を行うことが可能である。Fig.1にはシステムを用いた劣化評価と維持補修計画の評価手順を示した。

また、システムは地図データベース、劣化評価機能、地図データベースと劣化評価結果の表示機能の三つの部分から構成されており、評価地点の設定、各種解析条件の設定、劣化評価、評価結果の地図出力など一連の作業をコンピュータ画面上で行うことができる対話型処理を採用している。Fig.2には各種解析条件の入力と結果の表示画面の例を示した。

機能的な側面からシステムの特徴を整理すると以下ようになる。

- a. コンクリート構造物の配合条件、経過年数など、解析条件を一律に設定した劣化ポテンシャル評価に加え、構造物ごとに解析条件を設定することにより維持管理業務への展開を想定した劣化評価も可能である。
- b. 潜伏期から劣化期までの一連の劣化進行過程を考慮した、劣化評価が可能である。
- c. コンクリート構造物の現時点における劣化評価及び将来予測が可能である。
- d. ライフサイクルにおける最適な維持補修案とそのコスト評価が可能である。(この機能に関しては紙面の関係から、別の機

1) 法政大学(前 鹿島建設㈱技術研究所)

2) ITソリューション部

キーワード: コンクリート構造物, 劣化, 中性化, 塩害, 凍害, 気象, 配合, 地理情報システム

会に報告する。)

- e. 日本全国の気象条件及び JIS 配合のレディーミクスト製品の配合条件を地図データベースとして用意しており、これらの情報を考慮した劣化評価、予測を容易に行うことができる。
- f. 地理情報システムを活用したシステムであるため、広域に設置された多数の施設の劣化評価・予測結果の面的把握や相対比較が可能である。

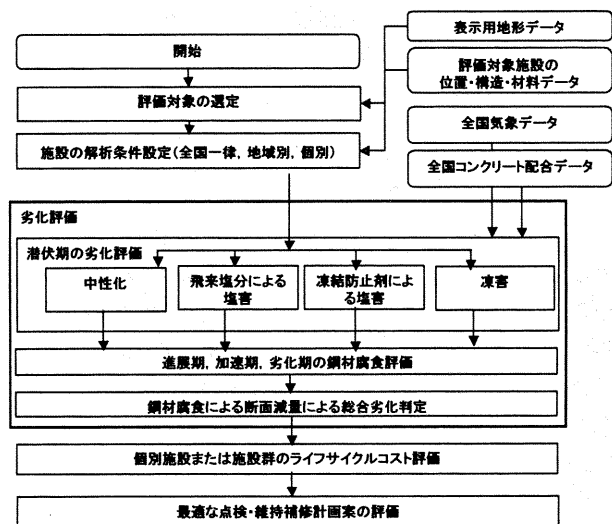


Fig.1 劣化ポテンシャル評価手順

(Flow Chart for Deterioration Assessment of Concrete Structures)

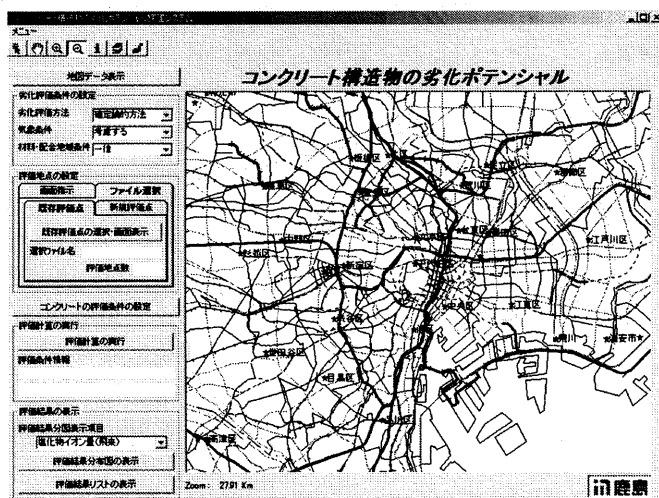


Fig.2 劣化ポテンシャル評価システムの画面例

(Assessment System for the Deterioration of Concrete Structures)

2. 地図データベース

前述のように地図データベースとして日本全国の気象条件と配合設計条件に関する地図データベースが用意されている。

気象条件データベースは、全国 1,769 地点の気象官署及びアメダス観測点のデータをもとに構築したものであり、全国の気象官署とアメダス観測点の位置と共に、5 年間、10 年間、20 年間の日平均気温、日最高気温が 0℃以上かつ日最低気温が-5℃以下の年間平均日

数、平均日較差、日最小湿度及び日平均湿度、平均海風率及び平均風速、平均日照時間、平均降雨量、降雪量別の平均日数を数値地図化している。

また、配合データベースは、北海道、東北、東京、横浜・静岡、甲信越、北陸、東海、近畿、中国、四国、九州の 11 地域の施工現場で利用している 275 工場に関して、JIS 配合レディーミクストコンクリートの 108 製品、4440 配合に関する調査を実施し、水セメント比、細骨材率、さらにセメント量、水、細骨材、粗骨材、混和剤の単位量などを数値地図化している。

なお、システムではメニュー画面から表示項目を選択することにより、データベースの内容を地図形式で容易に確認することができる。

Fig.3 及び Fig.4 には、システムの地図表示機能を利用した、平均気温とレディーミクストコンクリート製品（普通 24-12-20-N）の水セメント比の全国分布図の表示例を示した。

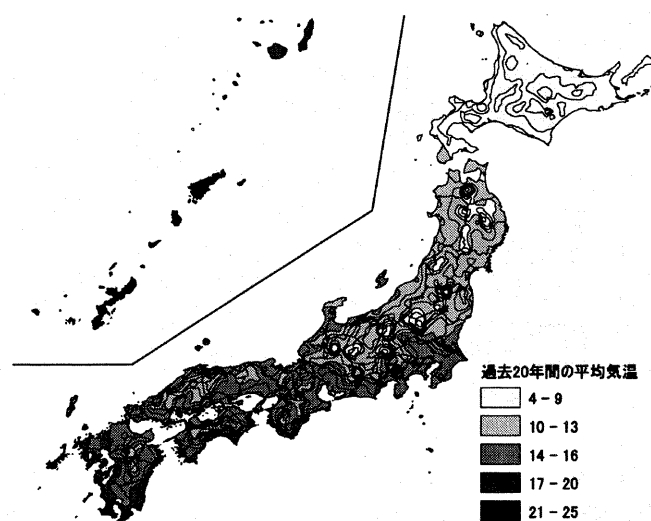


Fig.3 気象条件データの例（20 年間の日平均気温分布）
(Example data of Meteorological Database)

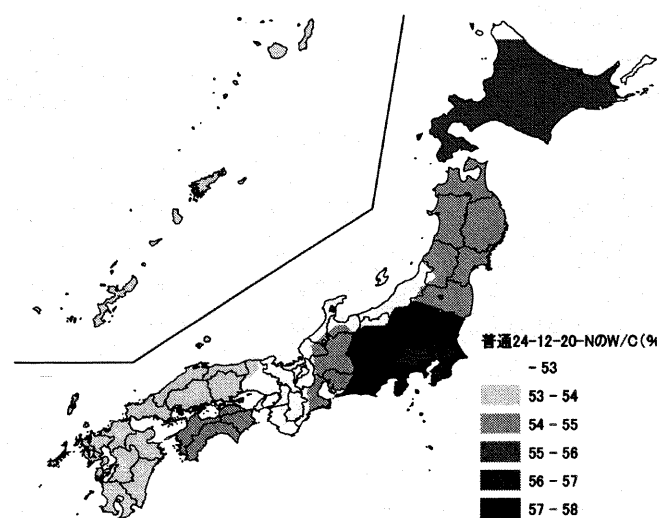


Fig.4 コンクリート配合条件の表示例
(普通 24-12-20-N の水セメント比)
(Example data of Mix Proportion Database)

3. 劣化評価方法

(1) 概要

2001 年度に制定された土木学会コンクリート標準示方書〔維持管理編〕では、コンクリート構造物の劣化進行過程を Fig.5 に示すように、潜伏期、進展期、加速期、劣化期に分類すると共に、各劣化過程の定義と期間を決定する要因を明示している。

システムでは、この一連の劣化進行過程に従って、潜伏期から加速期までの劣化評価、予測を可能にしている。まず、対象構造物の中性化、塩害、凍害に関してそれぞれ潜伏期の年数を求め、その中から最も短い年数を構造物の潜伏期に採用した。進展期に関しては、コンクリート中の鋼材の腐食速度と腐食ひび割れ発生限界の鋼材腐食量から進展期の年数と鋼材腐食量を評価し、加速期については、暴露環境下の鋼材腐食速度から鋼材腐食量を評価している。

以下には、システムで採用した中性化、塩害、凍害の各劣化評価方法を示すが、これらは、劣化評価、予測モデルの研究の進展と歩調を合わせて、適宜、更新していく予定である。

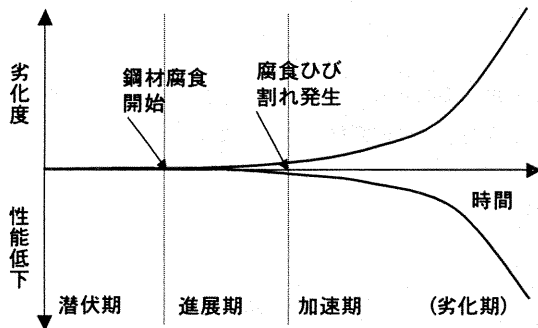


Fig.5 コンクリート構造物の劣化進行過程⁶⁾
(Deterioration Process of Concrete Structures)

(2) 潜伏期の評価

(a) 中性化

既往の研究成果⁷⁾から中性化による潜伏期 T_{0CO_2} の評価式を式(1)のように設定した。

$$T_{0CO_2} = \begin{cases} \left(\frac{(L - L_{lim})}{\alpha_c \beta_e \sqrt{\frac{R^2 (4.6w/c - 1.76)^2}{7.2}}} \right)^2 \frac{w}{c} < 0.6 \\ \left(\frac{(L - L_{lim})}{\alpha_c \beta_e \sqrt{\frac{R^2 (w/c - 0.25)^2}{0.3(1.15 + 3w/c)}}} \right)^2 \frac{w}{c} \geq 0.6 \end{cases} \quad \dots \dots (1)$$

ここに、 L はかぶり厚さ (cm)、 L_{lim} は鋼材腐食が開始する中性化残り (mm) で 3~10mm と言われているが、システムでは 10mm を仮定している。 α_c はひび割れ幅の平方根に比例する割増係数⁸⁾、 w/c は水セメント比、 R は使用したセメント、骨材、混和剤の種類から決まる中性化比率であり、約 0.2~7.2 の値をとる。また、式(1)の右辺の $\sqrt{\quad}$ の項は中性化速度係数であり、 β_e は対象構造物の水セメント比と対象地点の気温、湿度によって決まる中性化速度係数の環境係数であり、既往の研究³⁾を参考に補正値を設定した。具体的な β_e を水

セメント比 70%、気温 20 度、湿度 75% の場合を 1.0 として図示すると Fig.6 のようになる。

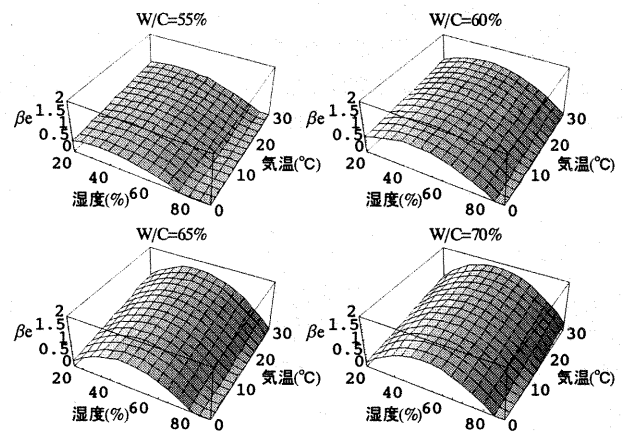


Fig.6 中性化速度係数の湿度、気温による補正係数 β_e
(Environmental Factor for Rate of Carbonation)

(b) 塩害

塩害の潜伏期 T_{0Cl} の評価式は、Fick の拡散則を仮定して得られる式(2)を用いた。

$$T_{0Cl} = \frac{1}{\alpha_t D} \left\{ L / 2 \times \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{cr} - C_i}{\beta_t C_0 - C_i} \right) \right\} \dots \dots (2)$$

ここに、 L はかぶり厚さ (cm)、 D は塩化物イオンの拡散係数 (cm²/年)、 α_t は塩化物イオンの拡散係数の温度補正係数、 C_{cr} は鋼材腐食が発生する限界塩化物イオン濃度 (kg/m³)、 C_i は初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m³)、 C_0 は表面塩化物イオン濃度 (kg/m³)、 β_t は表面塩化物イオン濃度の温度補正係数、 $\operatorname{erf}()$ は誤差関数である。

式(2)の鋼材腐食が発生する限界塩化物イオン濃度 C_{cr} は、1.2~2.5kg/m³ と言われているが、システムでは 1.2kg/m³ を採用している⁹⁾。塩化物拡散係数 D は既往の研究成果をもとにセメントの種類ごとに水セメント比の関数とし^{6), 9)}、Fig.7 の値を用いた。なお、上記の α_t 及び β_t は、Fig.8 の値を使用している。

表面塩化物イオンの主な供給源としては、海からの飛来塩分と融雪剤（凍結防止剤）が考えられる。海からの飛来塩分による表面塩化物イオン濃度 C_0 の推定方法としては、例えば、飛来塩分に関する観測データ¹⁰⁾から推定する方法や海岸線からの離岸距離と標高値を用いて経験式により推定する方法¹¹⁾などが提案されており、システムでは二つの方法による表面塩化物イオン濃度の推定が可能になっている。Fig.9 には海岸線からの離岸距離と標高値を用いた表面塩化物イオン濃度 C_0 の推定曲線を示した。

一方、融雪剤に関する表面塩化物イオン濃度 C_0 の推定にあたっては、まず散布量を推定する必要があるが、公表されている散布量のアンケート調査結果では施設管理者により散布方法や散布量が異なっていたり¹²⁾、スパイクタイヤの使用規制の強化に伴って散布量が大幅に増加するなど^{13), 14)}時代背景によっても大きく異なるため、全国を対象とした散布量の推定は事実上困難と考えられる。散布量

そのものは飛来塩分に比べると遥かに大きく、表面塩化物イオン濃度への換算など飛来塩分での知見をそのまま適用するには問題が多いと考えられるが、システムでは、道路交通情報として各自治体などが出している路面凍結予報や路面管理マニュアルなどを参考に降雪深と気温及び日数、検討期間に応じて散布量を推定し、飛来塩分と同様の方法で表面塩化物イオン濃度を評価した。

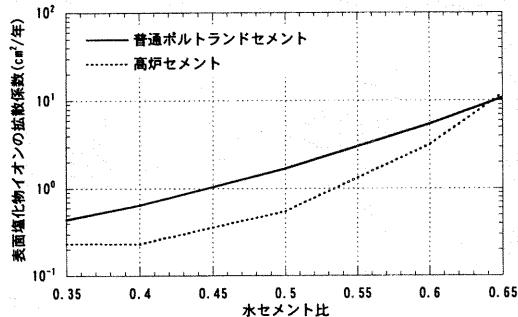


Fig.7 表面塩化物イオンの拡散係数 D
(Diffusion Coefficient of Surface Chloride Ion)

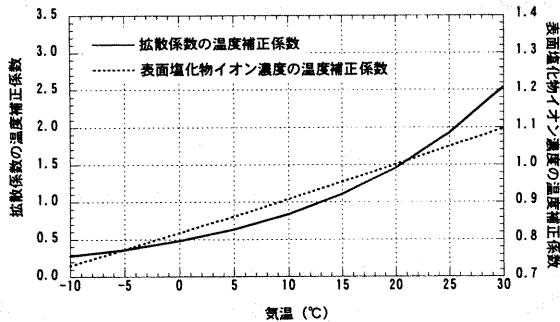


Fig.8 拡散係数と表面塩化物イオン濃度の温度補正係数
(Temperature Correction Factors of Diffusion Coefficient and Surface Chloride Ion Concentration)

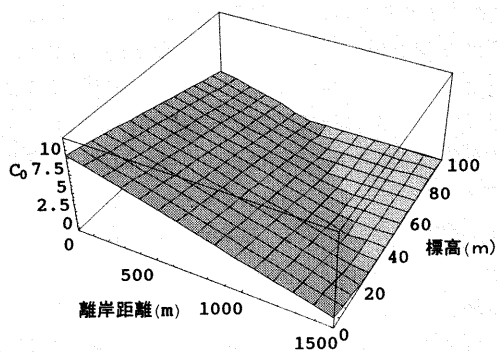


Fig.9 離岸距離、標高と表面塩化物イオン濃度の関係
(Estimated Surface Chloride Ion Concentration by Using Elevation and Distance from Shoreline)

(c) 凍害

凍害による潜伏期 T_{0Fz} の評価式を式 (3) のように設定した。

$$T_{0Fz} = \frac{N_{cr}}{\eta_{fs}} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 N_{cr} は限界凍結融解回数 (回) でありシステムでは 300 回を仮定している。また、 η_{fs} は 1 年当たりの凍結融解回数 (回) であり、気温の日変動データから推定している。

凍害の評価方法に関しては、これまでも多くの研究成果が報告されているため^{4), 5), 15), 16)}、本システムの趣旨との整合性を考慮しながら既往の知見を取り入れていく予定である。

(3) 進展期及び加速期 (劣化期) の評価

進展期は、コンクリート中にある鋼材が腐食を開始してからコンクリートの腐食ひび割れ開始までの期間であり、式 (4) で表される¹⁷⁾。

$$T_1 = \frac{W_{cr}}{W} \dots \dots \dots (4)$$

$$W_{cr} \approx 10 \frac{L}{\phi} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 W_{cr} はコンクリートの腐食ひび割れ発生限界腐食量 (mg/cm²)、 W はコンクリート中の鋼材の腐食速度 (mg/cm²/年) であり、Fig.10 のように水セメント比、湿度、かぶり厚さから求められる。 L はかぶり厚さ (mm)、 ϕ は鉄筋径 (mm) である。

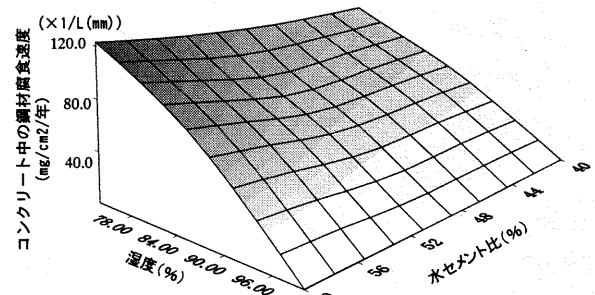


Fig.10 コンクリート中の鋼材の腐食速度
(Rate of Corrosion of Steel Bar in the Concrete)

加速期 (劣化期) は、進展期以降の腐食ひび割れの発達に伴って鋼材は大気中への暴露状態になり、腐食による鋼材の断面欠損が加速し、最終的に鋼材が消滅するまでの期間である。なお、加速期 (劣化期) における鋼材腐食速度は、湿度に応じて約 100~240mg/cm²/年を仮定している。

III. 事例解析

1. 概要と解析条件

本章では、日本全国の気象条件と配合条件の水セメント比に関する地域特性を考慮した劣化評価の事例解析を行い、劣化評価結果のうち、中性化と飛来塩分による塩害の評価結果を示した。解析で設定した条件を Table 1 に示した。

Table 1 事例解析の条件
(Specifications of Numerical Example)

評価地点数	日本全国の市区町村役場位置の 3,430 地点
経過年数	全国一律 30 年
かぶり厚さ	全国一律 50mm
対象 構 造 物	コンクリート JIS 配合のレディーミクストコンクリート (普通-24-12-20-N)
	水セメント比 JIS 配合のレディーミクストコンクリート (普通-24-12-20-N) の地域別平均値 (Fig. 4 の水セメント比を使用した)
飛来塩分による表面 塩化物イオン濃度	海岸線からの離岸距離と標高を用いた経験式を使用

2. 解析結果と考察

Fig. 11-13 は中性化の評価結果であり、中性化速度係数、環境係数及び中性化深さを示した。中性化速度係数は、水セメント比の増加と共に大きくなる特性を有しており、関東地方では本例題で仮定したレディーミクストコンクリートの水セメント比 (Fig. 4) が相対的に大きいため、中性化速度係数も大きな値となっている。また、環境係数は、水セメント比が大きいほど大きくなり、同一水セメント比の場合には、湿度が 40%前後で気温が高いほど大きな値となる傾向を有しており、今回の例題では北海道、東北、沖縄などで影響係数は小さく、関東、東海、大阪周辺、四国の西側で中性化への影響が大きくなる傾向となっている。これは過去に報告された同種の研究結果と整合する結果である。本例題では、中性化深さは 35mm 以下であり、中性化に関しては潜伏期と進展期の境界付近の状況にあることになる。

Fig. 14-16 は飛来塩分による塩害の評価結果であり、表面塩化物イオン濃度、拡散係数及び鉄筋位置での塩化物イオン濃度を示した。表面塩化物イオン濃度は離岸距離と標高が小さく、気温が高いほど大きな値となること、内陸部では 1.2kg/m^3 以下であり飛来塩分による塩害の危険性は非常に少ないことが確認できる。拡散係数は、水セメント比の増加と共に指数的に増加する特性を有しているため、中性化速度計異数と同様に関東地方で大きな値となっている。また、解析で仮定したコンクリート配合とかぶり厚さの場合、30 年が経過した時点で鉄筋位置での塩化物イオン濃度は、鋼材腐食の限界塩化物イオン濃度を大きく超えて加速期に入っており、大きな劣化が発生していることを示している。

IV. おわりに

本報告では、配合と気象条件の地域特性を考慮したコンクリート構造物の広域劣化評価方法とそれを組み入れた劣化評価システムに関して報告した。また、事例解析の結果を通して、使用目的が同じ構造物、あるいは類似構造物に関して全国的かつ定量的な劣化評価や相互比較を行う際に有効なツールとなることを示した。

なお、本報告では紙面の関係から紹介することのできなかった、維持補修に関するライフサイクルコストの評価方法に関しては、別紙にて報告する。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会；コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会報告書，2000。
- 2) セメント協会；耐久性専門委員会報告 D-1 耐久性を阻害する要因マップ，1985。
- 3) 鄭載東・平井和喜・三橋博三；モルタルの中性化速度に及ぼす温度・湿度の影響に関する実験的研究，コンクリート工學論文集，Vol. 1, No. 1, (1990. 1), pp. 85-93。
- 4) 長谷川寿夫；コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案，セメント技術年報，Vol. 29, (1975. 5), pp. 248-253。
- 5) 冨坂崇・浜幸雄・田畑雅幸・鎌田英治；コンクリートの凍害を対象とした気象条件評価の一提案，日本コンクリート工学協会 自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集，(1993. 5), pp. 279-284。
- 6) 土木学会；2001 年制定 コンクリート標準示方書 [維持管理編]，2001。
- 7) 岸谷孝一；鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設技術研究所出版部，1963。
- 8) 阿部保彦；ひび割れ幅がコンクリートの中性化深さに及ぼす影響に関する文献調査研究，日本コンクリート工学協会 コンクリート構造物のリハビリテーションに関するシンポジウム論文集，(1998. 10), pp. 7-14。
- 9) 土木学会；平成 11 年版 コンクリート標準示方書 [施工編]—耐久性照査型—，2000。
- 10) 建設省土木研究所；飛来塩分量全国調査 (IV) —飛来塩分量の分布特性と風の関係—，土木研究所資料，第 3175 号，(1993)。
- 11) 黒川省一・野村昌弘・飯田是昌；飛来塩分の影響を受ける道路橋の境界塩分量の推定，第 22 回道路会議論文集，(1997. 12), pp. 820-821。
- 12) 下村忠一・酒井洋一・中島久男；凍結防止剤の散布実態調査，土木技術資，第 31 巻 5 号，(1989. 5), pp. 50-55。
- 13) 月永洋一；寒冷地コンクリートの塩分供給源及び塩分浸透と凍結融解の複合作用に関する研究 (研究課題 02650406)，平成 3 年度科学研究費補助金 (一般研究 C) 研究成果報告書，1992。
- 14) 日本コンクリート工学協会；融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書・論文集，1999。
- 15) 田畑雅幸；コンクリートの凍害における環境条件の影響に関する研究，北海道大学博士論文，1986。
- 16) 田畑雅幸ら；コンクリートの耐凍害性に及ぼす環境要因の影響 (その 2. 自然環境の影響程度の評価)，日本建築学会北海道支部研究報告集，No. 62, (1989. 3), pp. 13-16。
- 17) 土木学会コンクリート委員会腐食防食小委員会；コンクリート技術シリーズ 鉄筋腐食・防食及び補修に関する研究の現状と今後の動向 (その 2)，土木学会，2000。
- 18) 鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計法研究委員会；鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計に関する考え方，日本コンクリート工学協会，1991。

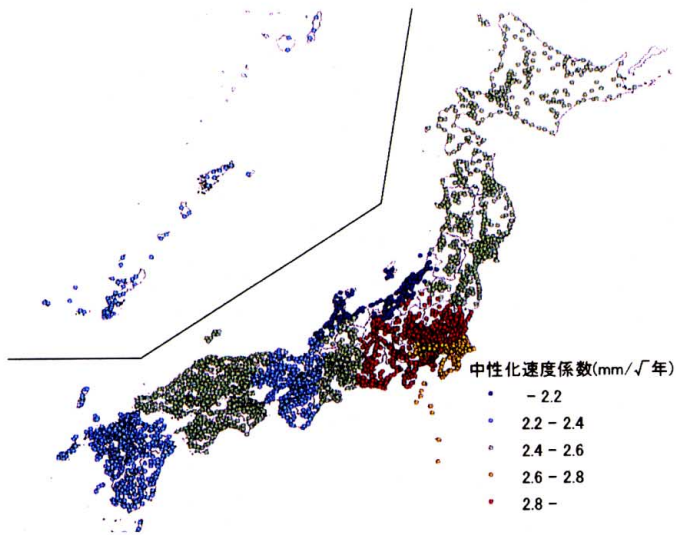


Fig.11 中性化速度係数の分布
(Map of Rate of Carbonation)

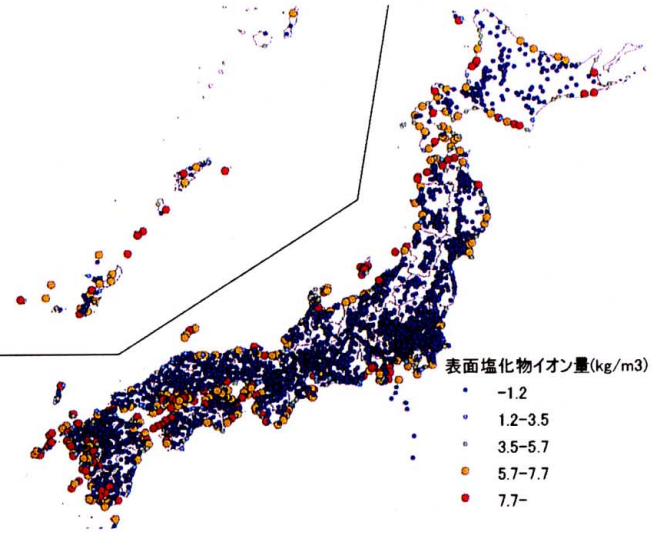


Fig.14 表面塩化物イオン濃度の分布
(Map of Surface Chloride Ion Concentration)

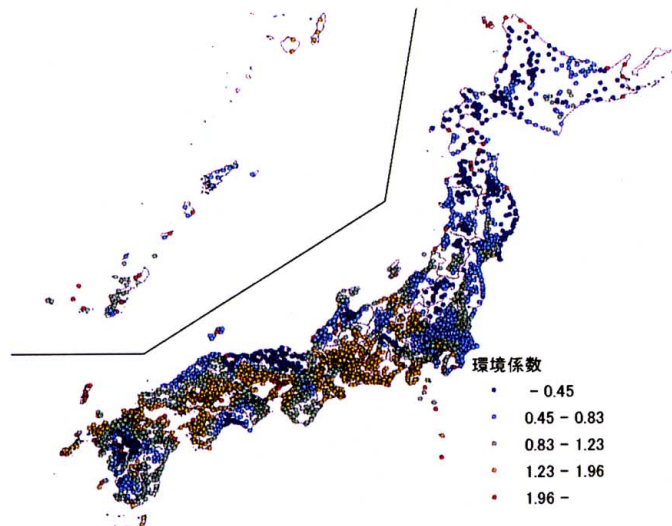


Fig.12 中性化速度係数の環境係数の分布
(Map of Environmental Factor for Rate of Carbonation)

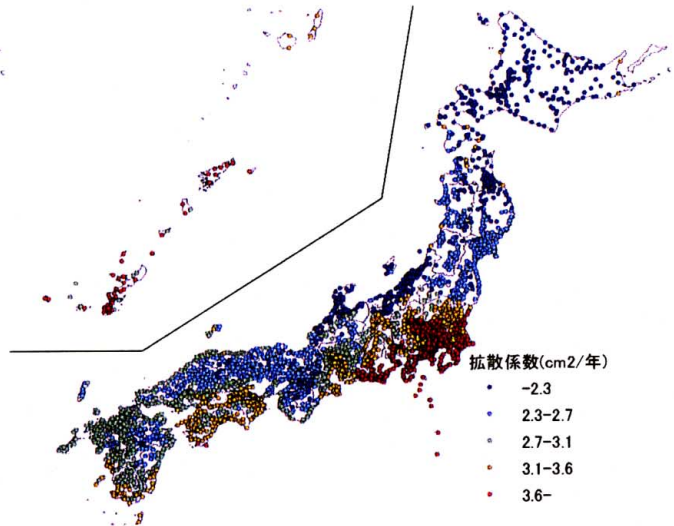


Fig.15 塩化物イオンの拡散係数
(Map of Diffusion Coefficient of Chloride Ion)

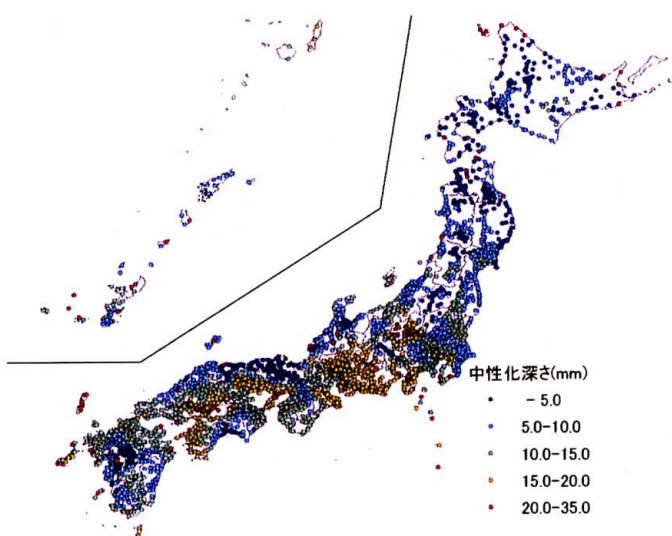


Fig.13 中性化深さの分布
(Map of Depth of Carbonation)

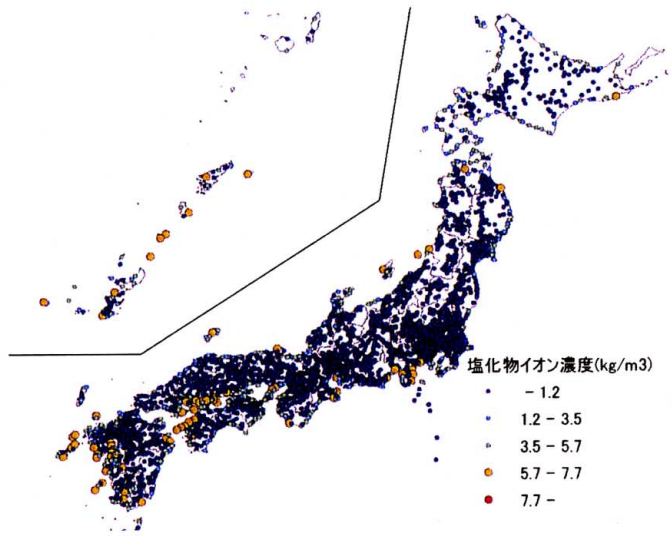


Fig.16 鉄筋位置における塩化物イオン濃度
(Map of Chloride Ion Concentration at Steel Bar)