

# 非破壊試験の組合せ評価による RC 構造物の予防保全型診断方法の検討

## Study of a Preventive Maintenance-type Diagnostic Method for RC Structures Using a Combination Evaluation of Nondestructive Tests

桃木 昌平<sup>※1</sup>  
Shouhei Momoki

板野 光純<sup>※2</sup>  
Mitsuyoshi Itano

槇島 修<sup>※3</sup>  
Osamu Makishima

### 【要旨】

筆者らは、鉄筋コンクリート構造物において、鋼材の腐食によるひび割れなどの損傷が顕在化する前に、予防的に対策を講じるための予防保全型の診断方法の研究を進めている。鋼材の腐食を引き起こす塩害や中性化は、外観上には変化が見られない状態で劣化が進行するため、劣化因子の進行程度や鋼材腐食の発生状況の診断は、コンクリートの一部を採取して評価することとなる。このような、破壊を伴う局所的な診断では、構造物に損傷を与えることや、経済性などから、劣化因子の進行程度が大きい箇所を選定することが求められる。

そこで、本研究では、劣化因子の進行程度が大きい箇所を選定する診断方法として、性質の異なる非破壊試験を組合せた評価方法を考案し、その有効性を実験的に検証した。試験体による検証の結果、塩害に対しては蛍光 X 線分析と表層透気試験の組合せ評価、中性化に対しては表層透気試験と機械インピーダンス試験の組合せ評価により、劣化因子の進行程度が大きい箇所を選定できる可能性が認められた。

【キーワード】 コンクリート 非破壊試験 塩害 中性化 予防保全

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 構造物の性能が、鋼材の腐食によるひび割れなどの損傷によって低下する場合には、損傷が顕在化する前に、予防的に対策を講じることが望ましい。しかし、塩害や中性化といった劣化機構では、外観上に変化は見られないため、鋼材の腐食が進行している可能性があり、その進行の程度は目視観察のみでは診断できない。そこで、塩害や中性化の進行程度や鋼材腐食の発生状況を把握するためには、コンクリートの一部を採取する診断方法が適用される。ただし、局所的な診断となることから、構造物を代表する適切な箇所、または、安全側の判断をするために、劣化因子の進行程度が大きい箇所での診断を行うことが求められる。

そこで筆者らは、多数の箇所で、かつ繰返しの評価が可能な非破壊試験 (Non-Destructive Test, 以下 NDT) に着目し、損傷が顕在化する前に劣化因子の進行程度を把握できる、予防保全型の診断方法を検討することとした。単独で実施される NDT の中には、コンクリートの耐久性の評価に有効であるとする報告もあるが<sup>1)</sup>、本研究では、性質の異なる複数の NDT を組合せて評価することにより、実構造物の劣化因子の進行程度を把握する方法を検討した。

本稿では、検討を行った NDT 組合せ評価の中から、蛍光 X 線分析と表層透気試験の組合せ評価による塩害の進行程度の推定、および表層透気試験と機械インピーダンス試験の組合せ評価による中性化の進行程度の推定について、実験的に検証した結果を報告する。

## 2. 検証実験の概要

### 2.1 試験体概要

評価するコンクリート試験体は、寸法 150×150×530 mm とした。コンクリートの配合を表-1に、試験体の養生条件を表-2に示す。塩化物イオンの浸透や中性化の進行の程度が異なるように、3水準の脱型および養生条件を設定した。材齢 28 日後は、コンクリートの含水状態を一定とするため、材齢 56 日まで温度 20°C、湿度 60% の気中環境に置いた。

塩害の進行程度の推定を検証する試験体は、1面 (150×530 mm) を除く 5面をエポキシ樹脂系接着剤によりシール処理し、乾湿繰返し法<sup>2)</sup>を参考に、20°Cの環境において、塩化ナトリウムの質量パーセント濃度が 3%である人工海水への 3日間の浸漬と、4日間の乾燥を 1サイクルとした乾湿の繰返しを 20サイクル行い評価した。

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
20	12	4.5	57.4	45.8	172	300	828	1007	3.75

表-2 試験体の養生条件

養生条件	気中養生	型枠養生	水中養生
脱型時の材齢	材齢 1 日	材齢 7 日	材齢 1 日
脱型から材齢 28 日までの養生方法	温度 20℃ 湿度 60% 気中環境	温度 20℃ 湿度 60% 気中環境	温度 20℃ 水中環境

表-3 試験項目および試験方法 (塩害)

	試験項目	試験方法
従来方法	表面塩化物イオン濃度, 塩化物イオンの見掛けの拡散係数	実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法 (案) (JSCE-G573)
NDT 組合せ評価	表面塩化物イオン濃度	エネルギー分散型蛍光 X 線分析法 (JIS K 0119)
	表層透気係数	ダブルチャンバー法 (Torrent 法) <sup>4)</sup>

中性化の進行程度の推定を検証する試験体は、2 面 (150×530mm の対面) を除く 4 面をエポキシ樹脂系接着剤によりシール処理し、促進中性化試験方法 <sup>3)</sup> を参考に、二酸化炭素濃度 5%、温度 20℃、湿度 60% とした促進中性化環境に静置し、促進材齢 26 週で評価した。

## 2.2 試験項目および試験方法

人工海水による乾湿繰返しを課した面と、促進中性化試験を行った面を、図-1 に示すように、3 つの領域に分けて、NDT による測定を実施した後、従来方法である破壊を伴う試験による測定を行うこととした。以下、塩害および中性化に対する試験項目および試験方法を示す。

### (1) 塩害

試験項目および試験方法を表-3 に示す。塩害の進行程度の推定に関する従来方法は、図-2 に示すように、試験体から φ75mm のコアを採取し、コンクリート表面から 20mm の深さごとの塩化物イオン濃度を電位差滴定法で測定する方法とした。深さごとに測定した塩化物イオン濃度の回帰によって表面塩化物イオン濃度を算定し、回帰式を式(1)に示す Fick の第 2 法則に基づく拡散方程式にあてはめることで、塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算定した (図-3)。なお、このときの期間: t は、

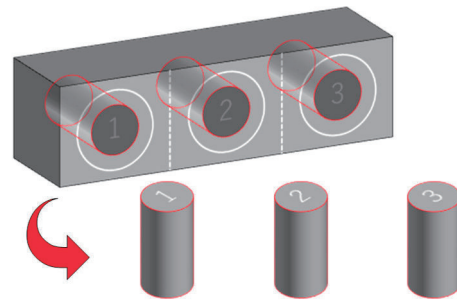


図-2 従来方法 (塩害・コア採取) イメージ

相対的な比較を目的としているため、実験のサイクル数に置き換えて計算することとした。

$$C(x, t) - C_i = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} \quad (1)$$

ここに、 $x$  : 表面から全塩化物イオン濃度を測定した箇所までの距離 (mm)

$t$  : 期間 (サイクル)

$C(x, t)$  : 距離  $x$  (mm), 期間  $t$  (サイクル) の全塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$C_0$  : 表面塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$C_i$  : 初期塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$D_{ap}$  : 見掛けの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/サイクル)

$\operatorname{erf}$  : 誤差関数

ただし、

$$\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta$$

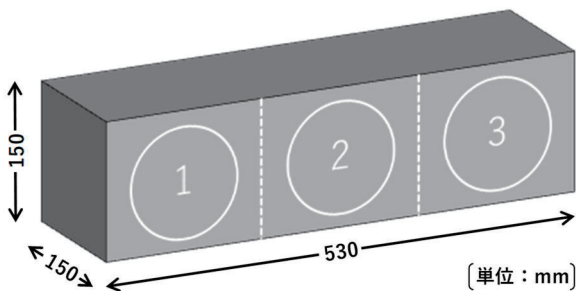


図-1 試験体測定位置

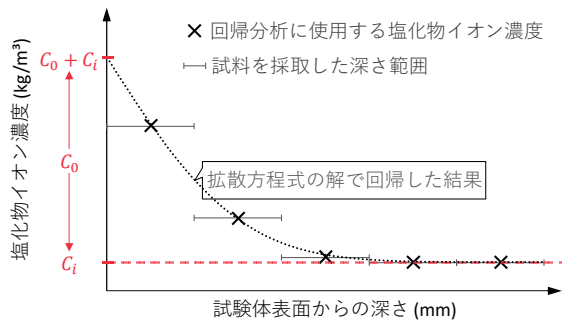


図-3 回帰分析の結果の一例

これに対し、NDTによる表面塩化物イオン濃度の測定は蛍光X線分析を用いた。蛍光X線分析とは、物質にX線を照射した際に発生する蛍光X線が、元素に対し固有のエネルギーを持つことを利用した方法である。塩素(Cl)固有のエネルギーを検出することで塩化物イオンの存在が把握でき、そのエネルギーの強度から、事前に作成された検量線を用いることで、塩化物イオン濃度を推定することができる<sup>9)</sup>。本研究では、写真-1に示すように、可搬式の蛍光X線分析装置を用いて、試験体の表面塩化物イオン濃度を測定した。

また、NDTによる相対的な塩化物イオンの見掛けの拡散係数の評価は、表層の緻密性の評価での代用を検討することとし、コンクリートの表層品質や物質移動抵抗性を評価可能な表層透気試験(写真-2)を用いた。

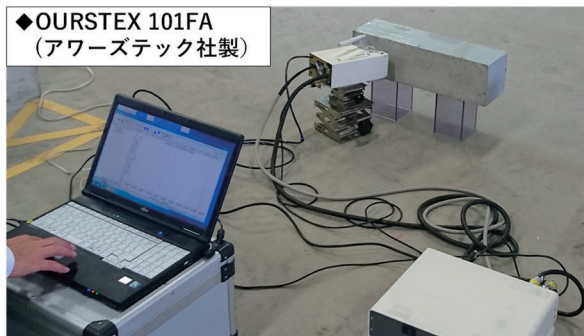


写真-1 蛍光X線分析による試験体の表面塩化物イオン濃度の測定

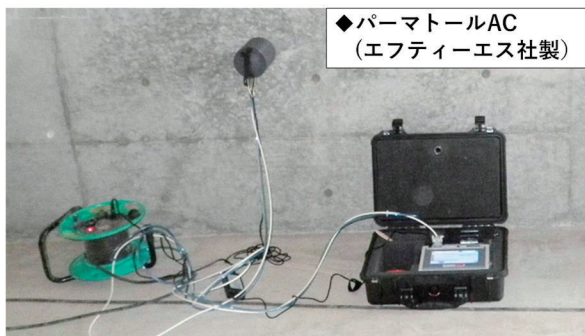


写真-2 表層透気試験

## (2) 中性化

試験項目および試験方法を表-4に示す。従来方法である中性化深さの測定は、図-4に示すように測定位置において試験体を割裂し、割裂面に噴霧したフェノールフタレイン溶液の呈色によって行った。

一方、中性化の進行程度のNDTによる推定は、コンクリートの表層品質や物質移動抵抗性を評価可能な表層透気試験と、コンクリート表層の弾性的性質を評価し、表層の強度等を推定可能な機械インピーダンス試験によって行った(写真-3)。これらの試験は、中性化深さを測定する試験体(以下、中性化有り)と、比較参照用とする中性化促進試験と同期間気中養生した試験体(以下、中性化無し)に対して、従来方法の中性化深さの測定前に実施した。

表-4 試験項目および試験方法(中性化)

	試験項目	試験方法
従来方法	中性化深さ	コンクリートの促進中性化試験方法(JIS A 1153)
NDT 組合せ 評価	表層透気係数	ダブルチャンバー法(Torrent法) <sup>4)</sup>
	機械インピーダンス	コンクリートの非破壊試験-打撃試験方法-インピーダンス(NDIS 3434-3)

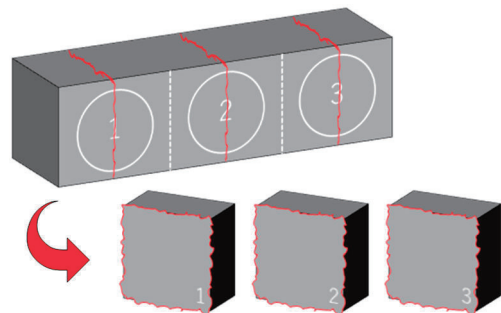


図-4 従来方法(中性化・割裂)イメージ



写真-3 機械インピーダンス試験



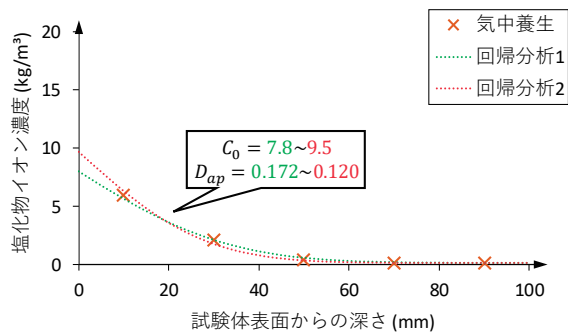
### 3. 検証実験結果と考察

#### 3.1 塩害の進行程度の診断

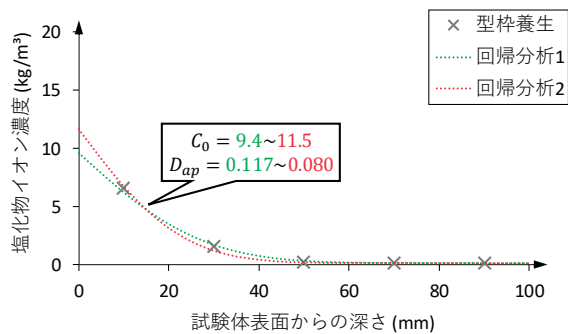
##### (1) 従来方法

図-5に従来方法で得られた測定値から近似する回帰分析結果を示す。今回は、コンクリートの表面から20mmの深さごとの測定値であったため、設定する初期値により回帰分析結果が変動することもあり、推定した回帰分析の結果は、想定される範囲で異なる2つの回帰式で示す。測定値が少なく、それぞれの値も小さい水中養生の回帰分析は、特に大きな差異が生じる結果となった。

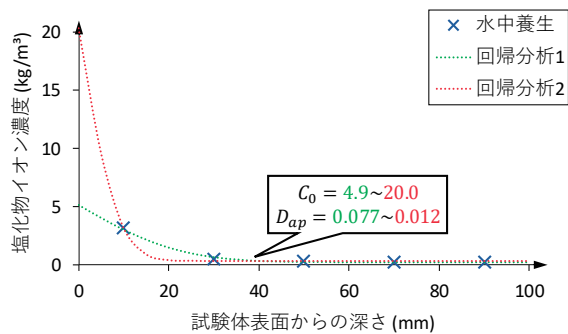
図-6に回帰分析で得られた表面塩化物イオン濃度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係を示す。同図も図-5と同様に、回帰式から得られた推定範囲を示している。この図のように表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数を示すことで、例えば表面塩化物イオン濃度が高く、塩化物イオン濃度の見掛けの拡散係数が大きい



(a) 気中養生



(b) 型枠養生



(c) 水中養生

図-5 回帰分析結果

ほど、つまりは図の右上にプロットされるほど、塩害劣化を受けやすい環境であること、コンクリートの塩化物イオンの浸透性が高いということが考えられ、塩害の進行程度が高いと判断される。

塩化物イオンの見掛けの拡散係数については、気中養生、型枠養生、水中養生の順に大きく、養生条件によるコンクリートへの塩化物イオンの浸透性の違いを評価できている。

また、推定される表面塩化物イオン濃度については、一定の塩害環境で試験を行っていることから、養生条件によって差が生じないと予測していたが、養生の条件によって差異が生じる結果となった。

##### (2) NDT 組合せ評価

図-7に、各試験体の蛍光X線分析によって測定した表面塩化物イオン濃度と表層透気係数との関係を示す。

各養生条件の透気係数は、塩化物イオン濃度の見掛けの拡散係数の大きさの順と一致していた。したがって、透気係数を測定することにより、塩化物イオンの見掛けの拡散係数の大きさを、グレード分けできる可能性が示された。

また、蛍光X線分析によって測定された、表面塩化物イオン濃度については、先述したように同じ塩害環境であれば同一の表面塩化物イオン濃度になると予想したが、図-6と同様に、養生方法の違いによって異なる値にな

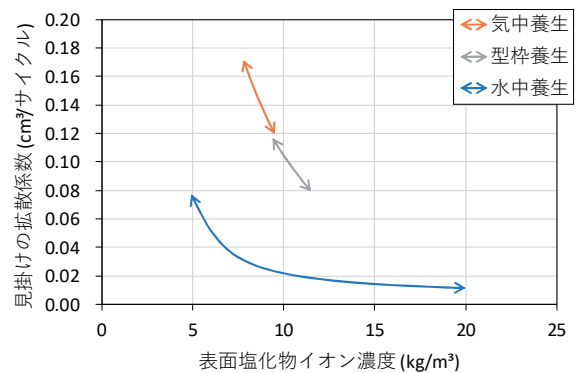


図-6 表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数

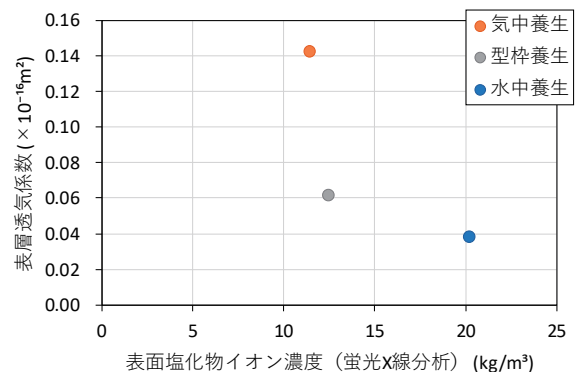


図-7 蛍光X線分析結果と表層透気係数

っていることを確認した。ただし、蛍光 X 線分析によって測定した表面塩化物イオン濃度は、従来方法に比べて直接的であり、実態を示しているものと考えられる。したがって、従来方法における水中養生試験体の表面塩化物イオン濃度も高かったと推察され、表面塩化物イオン濃度の傾向も、従来方法と蛍光 X 線分析とで概ね一致していたと考えられる。このように、蛍光 X 線分析では、実構造物において実態の表面塩化物イオン濃度が評価できるため、同一環境下にあっても詳細な評価になる。

以上より、図-8 に示すように蛍光 X 線分析などの NDT により表面の塩化物イオン濃度を測定し、表層透気試験により塩化物イオン濃度の見掛けの拡散係数のグレードを判別することで、同一構造物における、最も塩害の進行程度が高いと考えられる位置を選定できる可能性がある。この最も塩害の進行程度が高いと推定される位置からコアを採取し、コンクリート内部の塩化物イオン濃度を実測すれば、より安全側の判定が行える、予防保全型の診断に有効と考えられる。

### 3.2 中性化の進行程度の診断

#### (1) 従来方法

図-9 に、中性化促進材齢 26 週における、各養生条件で測定された中性化深さを示す。中性化深さは気中養生、型枠養生、水中養生の順に大きく、養生条件の設定により、コンクリートの中性化の進行程度が異なる試験体を作製できたことを確認した。

#### (2) NDT 組合せ評価

図-10 に、各養生条件で測定された表層透気係数を示す。中性化深さが大きかった試験体ほど、表層透気係数が大きい結果であった。各養生条件の中性化無しと中性化有りを比較すると、一定の傾向は無く、中性化の有



図-8 NDT 組合せ評価による塩害の進行程度の診断

無や進行程度が表層透気係数に与える影響を読み取ることにはできなかった。つまり、表層透気試験の結果は、中性化の有無や進行程度に関わらず、養生条件の設定により作り出されたコンクリートの中性化しやすさを評価していると言える。

一方、図-11 に各養生条件で測定された機械インピーダンスを示す。養生条件の設定によるコンクリートの表層強度の違いが、機械インピーダンス試験の結果に表れている。ここで、各養生条件の中性化無しと中性化有りと比較すると、いずれも中性化無しに比べ中性化有りの試験体の機械インピーダンスが大きい。このことから、機械インピーダンス試験の結果は、中性化の進行を捉えていると考えられる。

これらの試験の結果を踏まえ、表層透気係数と機械インピーダンス試験の組合せにより、中性化の進行程度を診断できる可能性を見出した。この NDT の組合せを適

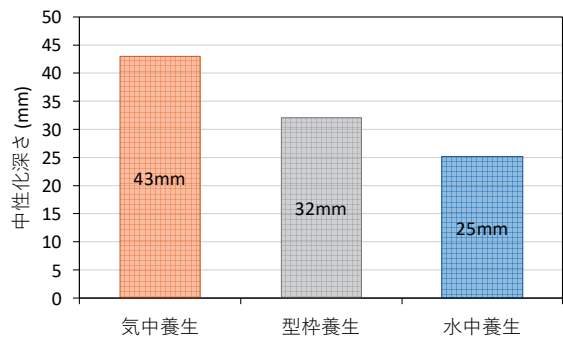


図-9 中性化深さ測定結果

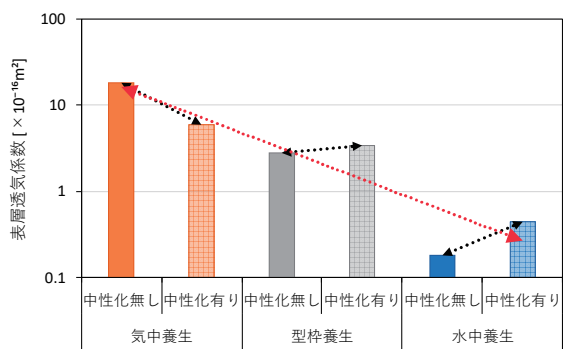


図-10 表層透気試験結果

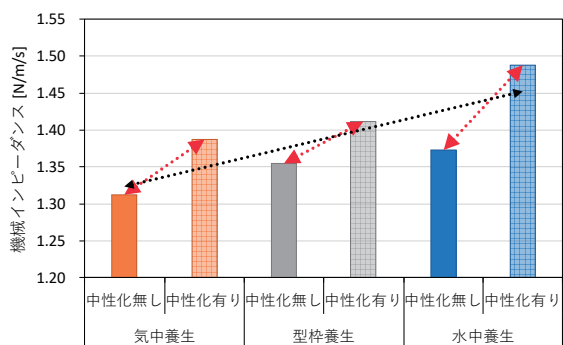


図-11 機械インピーダンス試験結果

用した，中性化の進行程度を診断する方法として，以下のような手順で実施することを提案する。

図-12に示すように，まず対象とするコンクリート構造物において表層透気試験を行い，表層透気係数が大きく，つまりは中性化しやすい箇所を選出する．次に，その箇所において機械インピーダンス試験を行う．同程度の表層透気係数を示す中で，機械インピーダンスが相対的に大きい箇所が，中性化しやすく，かつ中性化がより一層進行している可能性がある箇所である．したがって，この箇所においてコンクリートの一部を採取して測定を行うことで，より適切で安全側の判断が可能となる。



図-12 NDT 組合せ評価による中性化の進行程度の診断

#### 4. おわりに

本研究では，性質の異なる複数の NDT を組合せて評価することにより，劣化因子の進行程度を把握し，実構造物の現状を診断する方法を検討した。

蛍光 X 線分析と表層透気試験の組合せ評価により，コンクリートの塩害の進行程度を定性的に診断できる可能性を見出した．これにより，例えば構造物における塩害の進行程度が大きい箇所を抽出し，コアの採取位置を選定することで，より効果的な診断が実施できる．また，表層透気試験と機械インピーダンス試験の組合せ評価による，コンクリートの中性化の進行程度を診断する方法も提案した。

本稿で示した NDT 組合せ評価については，その他の NDT との組合せによって精度が向上することも考えられる．さらに検討を進めるとともに，構造物や部材への負荷を最小限に留めることが可能な予防保全型診断方法の一つとして活用していきたい。

#### 【参考文献】

- 1) 林 和彦, 細田 暁: 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 69, No. 1, pp. 82-97, 2013.
- 2) 日本コンクリート工学会: JCI 規準集 (1977~2002 年度), pp. 99-105, 2004.04.
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 [規準編] JIS 規格集, pp. 710-713. 2018.
- 4) 日本非破壊検査協会: 新コンクリートの非破壊試験, pp. 188-189, 2010.
- 5) 永井宏樹: 高感度ポータブル蛍光 X 線分析装置の開発—蛍光 X 線分析法を用いたコンクリート中の塩害調査—, 検査技術, 第 13 巻, 第 3 号, pp. 71-75, 2008.

**Summary** We are proceeding with a study of a preventive maintenance-type diagnostic method in order to implement preventive measures before the actualization of cracking and other damage due to the corrosion of steel materials in RC structures. Since salt damage and neutralization that cause the corrosion of steel also promote deterioration under the condition where the changes are not visible from the appearance, the degree and the progress of the deterioration factor and the diagnosis of the generation of steel corrosion should be evaluated by sampling a part of the concrete. For such a local diagnosis accompanying any breakage, the selection of the location where the degree of progress of the deterioration factor is large is required from the viewpoint of damage to the structure and economic efficiency. Therefore, we devised an experimental evaluation method in this study that combines nondestructive tests with different properties as the diagnostic method for selecting the location where the degree of progress of the deterioration factor is large and verified its effectiveness. As a result of the verification using specimens, there is a possibility that the location where the degree of progress of the deterioration factor is selected by performing an evaluation combining fluorescent X-ray analysis and a surface layer gas permeability test for salt damage and by performing an evaluation that combines a surface layer gas permeability test and a mechanical impedance test for neutralization.

**Key Words :** Concrete, Non-Destructive Test, Salt Damage, Neutralization, Preventive Maintenance