

即発ガンマ線分析による塩化物イオン濃度分布の測定 および実構造物への適用性に関する基礎的研究

愛媛大学大学院 学生会員 ○木下雄司 山田耕大 正会員 氏家勲 岡崎慎一郎

1. はじめに

現在, RC を対象とした非破壊による劣化診断技術の早急な確立が求められている. 特に塩害による劣化は, 腐食ひび割れが顕在化するまでは目視による診断が不可能なため, かぶりコンクリート中の塩化物イオン (以下 Cl^-) 濃度の分布状況を知る必要がある. 本研究では, 非破壊で試料調整を必要とせず, 比較的短時間の測定で分析が可能な即発ガンマ線分析 (Prompt Gamma-ray Analysis : PGA) を, 構造物におけるかぶりコンクリート中の Cl^- 濃度分布の測定に適用することを目的として基礎的な検討を行ったものである.

2. 即発ガンマ線分析

即発ガンマ線分析は, 熱中性子が対象物中に含まれる元素の原子核に捕獲された際に放出される即発ガンマ線を, 放射線検出器によって測定する分析方法である. 多元素同時測定が可能であり, エネルギースペクトル中でのピークの位置とピークの面積 (即発ガンマ線計数) から含有元素の定量分析することができる. 本実験では日本原子力研究開発機構の研究用原子炉に設置されている図-1 のような即発ガンマ線分析装置を用いて行った. 中性子ガイド管により, 炉心からの熱中性子ビーム状に発射し, 放出された即発ガンマ線を, 高純度ゲルマニウム検出器を用いて検出する. 本研究では, 骨材の影響を除くために, セメント中のカルシウムを内標元素とし, カルシウムの即発ガンマ線計数に対する Cl^- の即発ガンマ線計数の割合 (以下, 即発ガンマ線計数比: R) を指標に用いた.

測定試料は所定の濃度に調整されたモルタル板を 5 枚組み合わせた供試体である. モルタル板は $30 \times 30 \text{ mm}$, 厚さが 5 mm , $\text{W/C}=40\%$, $\text{S/C}=100\%$ であり, セメントには普通ポルトランドセメントを, 細骨材にはカルシウムを含まない珪砂を使用した. モルタル板供試体について, 各モルタル板の 1 枚目から 5 枚目までの位置をそれぞれ 1st, 2nd, 3rd, 4th, 5th, と呼ぶ. 以下のケースに分け試験を実施した. Case A: 一様な Cl^- 濃度の供試体, Case B: 各 Cl^- 濃度においてモルタル板 1 枚と Cl^- を含まない $0 \text{ wt}\%$ のモルタル板を 4 枚組み合わせて, Cl^- を含んだモルタル板の位置を移動させた供試体, Case C: 実際のコンクリート構造物で見られる Cl^- 濃度分布に近いように組み合わせたモルタル板供試体である.

3. 即発ガンマ線分析による測定結果

一様な濃度のモルタル板供試体を測定すると, Cl^- 濃度と即発ガンマ線計数比は比例関係にあるという結果が得られた. 次に, Case B のモルタル板供試体について, Cl^- を含むモルタル板を 1st から 5th へ, 一枚ずつ移動させて測定した. その結果, 図-2 に示すように, 供試体に含まれている Cl^- が表面から深くなるにつれて即発ガンマ線計数比は指数関数的に減少することがわかった. これは, 中性子の一部が供試体内部で吸

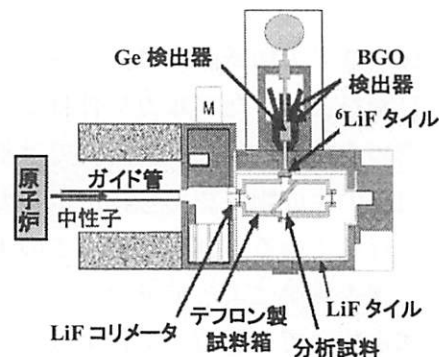


図-1 分析装置の体系図

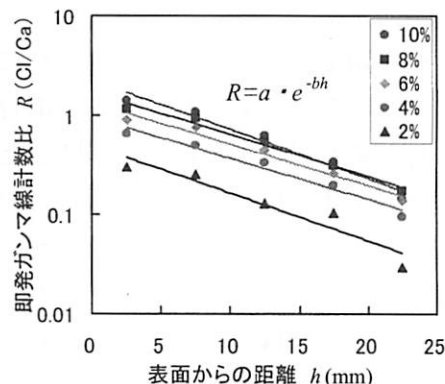


図-2 表面からの距離と即発ガンマ線計数比の関係

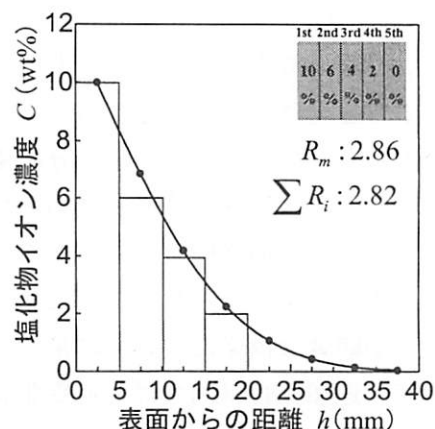


図-3 推定結果の一例(1)

収・散乱され、透過する中性子の数が減り、発生する即発ガンマ線が減少するためである。したがって、即発ガンマ線分析を用いてコンクリート内部の塩化物イオン濃度を評価するには、この影響を考慮した校正曲線を提案する必要がある。

図-2の直線は最小二乗法により、 $R = a \cdot e^{-bh}$ で回帰した結果である。ここで、 R は即発ガンマ線計数比、 h は供試体表面からの深さであり、表面から各モルタル板の厚さの中心までの距離である。 a と b は回帰係数である。係数 a は深さ方向の位置 $h=0$ (供試体表面)での即発ガンマ線計数比であるので、係数 a は Cl^- 濃度 C に比例する。係数 b は中性子の減衰によって即発ガンマ線計数比が減少する際の勾配であり、 Cl^- 濃度とは関係なく一定となる。以上のことから、位置の影響を考慮した校正曲線は、 $R = a' C \cdot e^{-bh}$ (1) となる。ただし、係数 a' および b は中性子源、測定装置や測定時間などによって変化するので、測定条件に応じて校正曲線を設定する必要がある。

4. 実構造物への適用に関する検討

コンクリート構造物における Cl^- の浸入状況の予測はフィックの拡散方程式に基づいて行われるが、その解の一つである誤差関数による次式を用いる。

$$C_i = C_1 \left[1 - \operatorname{erf} \left\{ \frac{2}{n-1} (i-1) \right\} \right] \quad i=1,2,3 \cdots n \quad (2)$$

これには、対象物の表面における Cl^- 濃度を既知として与える必要がある。事前の実験から測定対象物の表面と平行に近い角度で中性子を照射すれば、非破壊で簡単に測定対象物の正確な表面濃度 C_1 を測定することができることが判明した。そこで本論文では C_1 を既知の値とし、式(2)によって Cl^- 濃度分布の形状を仮定した後、式(1)の校正曲線を用いて塩化物イオン濃度分布の推定を行う。まず、 Cl^- の浸透深さ n を仮定する。校正曲線を用いて得られた即発ガンマ線計数比の計算値 ΣR_i が、供試体を測定して得られた即発ガンマ線計数比の実測値 R_m と一致するまで仮定を繰り返し、最も一致したときを推定結果とする。図-3にフィックの拡散方程式に基づく推定結果の一例を示す。推定結果は供試体の設定値をおよそ推定していると言える。表層部分において Cl^- 濃度の低減が見られる場合には、以下に示す推定方法が適用される。測定方法は、供試体の前に Cl^- を含まない0wt%のモルタル板を5枚並べて測定し、それを1枚ずつ抜き、供試体の後ろに設置して測定を繰り返す。推定は測定範囲の限界位置において行われる。図-4に、推定結果を記載する。推定結果は濃度を過小評価しているが、分布のピーク位置を捉えており、ある程度の精度で分布形状を評価していると言える。

5. 結語

即発ガンマ線計数比と Cl^- 濃度は比例関係にあり、即発ガンマ線計数比は測定対象物が表面から深い位置になればなるほど指数関数的に減少する。フィックの拡散方程式に基づく誤差関数による式を利用し、校正曲線を用いて測定結果と一致するように Cl^- 濃度分布を仮定すれば、即発ガンマ線分析によって非破壊で Cl^- 濃度分布の推定が可能である。対象物の前に0wt%のモルタル板を並べて測定し、得られた即発ガンマ線計数比から Cl^- 濃度を推定すれば、表面に濃度のピークがない分布の場合に、分布形状は比較的良好に把握することができた。

参考文献

- 1) 今本啓一, 下澤和幸, 山崎順二, 二村誠二: 実構造物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状, vol.44, No.2, pp.31-38, 2006.2.
- 2) Torrent, R., A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Mater.&Struct., v.25, n.150, pp.358-365, July 1992.

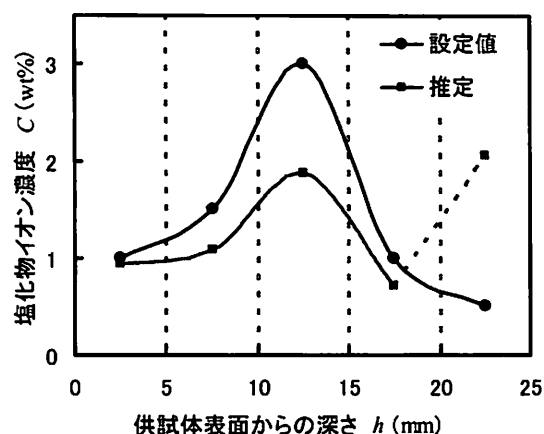


図-4 推定結果の一例②