

即発γ線分析によるコンクリート中の塩化物イオン濃度分布の 非破壊測定方法の開発

Development on Non-Destructive Measurement Method of Chloride Ion Concentration in Concrete by PGA

氏家 勲¹⁾ 岡崎 慎一郎¹⁾ 松江 秀明²⁾
Isao UJIKE Shin-ichiro OKAZAKI Hideaki MATSUE

¹⁾愛媛大学大学院理工学研究科 ²⁾原子力機構

本研究は即発γ線分析を利用した非破壊でコンクリート内部の塩化物イオン濃度分布を測定する方法の開発に資するための基礎的な研究である。本研究ではコンクリート中の塩化物イオンを即発γ線分析した際の測定値である計数比に及ぼすコンクリートの配合の影響を検討している。また、深さの影響を考慮した校正曲線を用い、さらに中性子ビームの供試体に対する照射角度を変化させて即発γ線分析を行い、コンクリート内部の塩化物イオン濃度分布の形状を推定することを試みた。

キーワード：中性子，即発γ線分析，塩化物イオン濃度，非破壊検査

1. 目的

本研究は、非破壊で試料調整を必要とせず、さらに短時間の測定で分析が可能な即発γ線分析 (Prompt Gamma-ray Analysis : PGA) を、コンクリート中の塩化物イオン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。本研究では、所定の塩化物イオン濃度に調整したモルタル板を組み合わせた供試体を用いて、即発γ線計数比と塩化物イオン濃度の関係およびその関係に及ぼすモルタル板の深さ方向に関する位置の影響を調べ、さらにそれらの関係から、異なる塩化物イオン濃度のモルタル板を組み合わせた供試体の塩化物イオン濃度分布が推定できるのかを検討した。

2. 方法

即発γ線分析(以下、PGA)は、以下の原理に従う。測定対象物中に含まれる元素の原子核に熱中性子が捕獲された際、核種は励起状態となる。励起状態から安定状態に戻る際に即発γ線が放射される。これを放射線検出器によって測定し元素分析を行う方法である¹⁾。対象物中の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γ線計数)から含有元素を定性・定量分析できることが特徴として挙げられる。この分析方法は対象物を非破壊で試料調整の必要性がなく、さらに少量の試料で比較的短時間に分析できるという利点がある。通常、かぶりコンクリートの塩化物イオン濃度を知るための試験は、コアリングによる破壊検査が一般的であり、これはコアリングおよび試料分析に要するコストが大きいうえ、また採取後はモルタルを用いて埋め戻すために、一度試験を行うと同一箇所において検査を行うことができないという欠点を有する。この欠点を補うための非破壊試験のひとつとしてPGAは将来期待されている手法である²⁾。

本研究では、セメントペースト部分における塩化物イオンを定量分析するために内部標準法

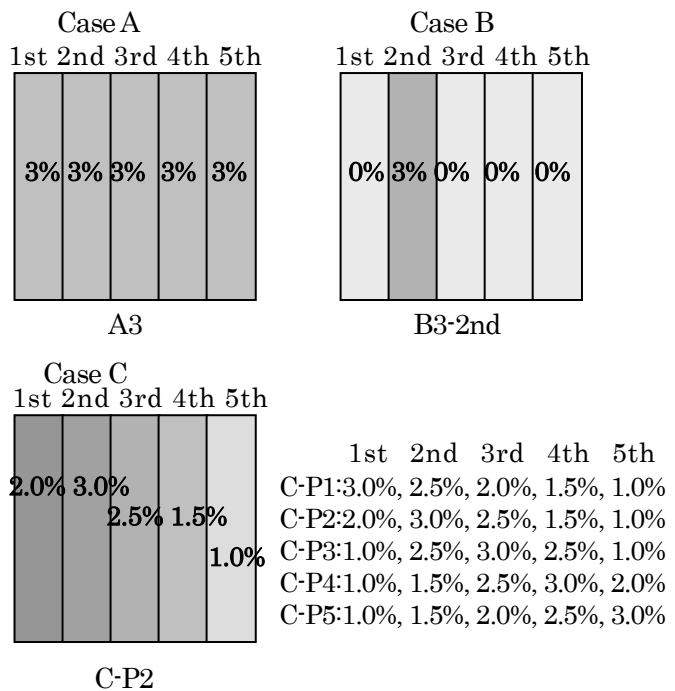


図-1. 1st~5th のモルタル板の組み合わせ

を採用した。セメントに多く含まれているカルシウムを内部標準元素とし、カルシウムの即発ガンマ線計数に対する塩化物イオンの即発ガンマ線計数の割合（以下、即発ガンマ線計数比と呼ぶ）を指標に用いた。なお、本研究で使用した供試体は、塩分濃度調整を行った5mm厚のモルタル板状供試体、モルタル角柱供試体である。濃度調整を施したモルタル板を組み合わせることで、任意の濃度分布を持たせた供試体を再現することが可能である。モルタル板は70×30×5mm、W/C=40%、S/C=100%であり、セメントには普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)を、細骨材にはカルシウムを含まない豊浦標準砂(表乾密度2.64g/cm³)を使用した。また、塩化物イオンの質量がセメントの質量に対して任意の濃度(0.5%間隔で0%~3%)となるようにあらかじめ練り混ぜ水に塩化ナトリウムを添加して濃度調整をした。モルタル板供試体について、各モルタル板の1枚目から順に1st, 2nd, ~と表記する。測定試料は、1st~5thの範囲でいずれかに塩化物イオン濃度ピークが現れるようにモルタル板を組み合わせ、6th~10thには塩化物イオンを含まないモルタル板を並べて合計10枚とする。図-1は1st~5thのモルタル板の組み合わせを示したものである。モルタル角柱供試体は、配合条件をW/C=40, 50, 60%の3水準、S/C=0%から200%までの値、塩化物イオンがセメント量の3%となるように設定し、40×40×50mmの寸法のモルタル製角柱供試体を作製した。供試体全体におけるW/C、骨材量、塩化物イオン量などの組成は均一なものとする。

3. 研究成果・考察

これまでの研究より、塩化物イオンの濃度と位置に関する以下のような校正曲線が提案されている³⁾。

$$R = aCe^{-bh} \dots (1)$$

ここで、 R は即発ガンマ線計数比、 C は塩化物イオン濃度、 h は深さ方向の位置を表し、 a と 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係数である。これまでの研究では、単一配合で作製された供試体でのみ実験を行ってきたので、配合条件によりこの校正曲線に含まれる即発ガンマ線計数比が影響を受けるのかを検討した。図-2と図-3の結果からは、W/CおよびS/Cが変化しても即発ガンマ線計数比への影響は低いことが確認できた。

本研究では、塩分濃度推定手法として変角照射試験を行った。変角照射試験の概要を以下に記す。即発ガンマ線分析を行う供試体が一定幅の層状で構成されていると考えたとき、また中性子線の測定範囲が定まっていると考えたとき、供試体に対して照射角度を変化しつつ即発ガンマ線分析を行えば、各層において測定範囲上に分布する層の幅が最長となる照射角度が決定する。ここで、いずれかの層に塩分濃度ピークを持つ供試体に変角照射を行えば、即発ガンマ線計数比が最大となる照射角度が出現し、これに対応した層が最も濃度の高い層となる。

本試験では、濃度調整を行ったモルタル板を5枚並べることでいずれかの位置に濃度ピークを持つ供試体を作製した。図-4は変角照射法の概要を示す。これまでの検討で中性子は5枚以上のモルタル板を透過し、6枚目以降のモルタル板からも即発γ線が発生するが、バラ

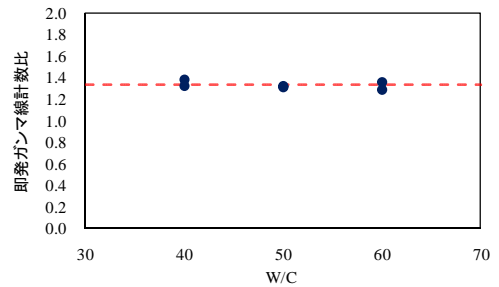


図-2 W/Cの違いによる計数比の比較

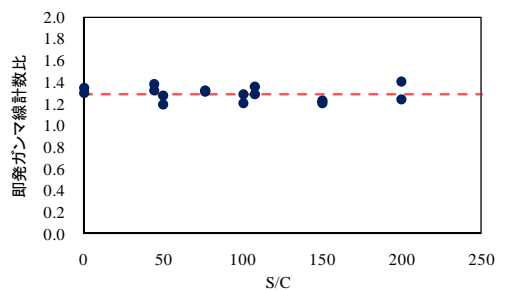


図-3 S/Cの違いによる計数比の比較

表-1 ピーク位置と照射角度

厚さ5mmの供試体のとき 中性子線の通る軌跡が最長になる角度	
ピーク	照射角度
1st	80
2nd	65
3rd	50
4th	35
5th	0

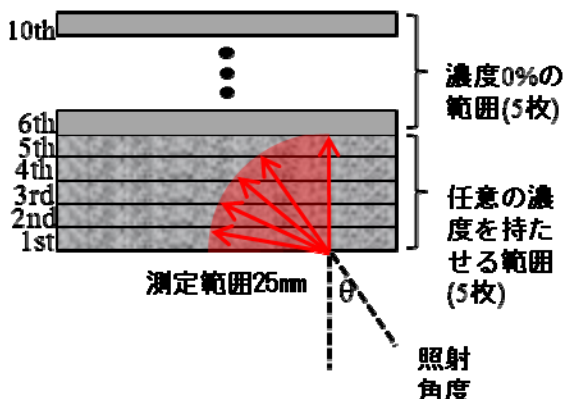


図-4 変角照射試験の概要

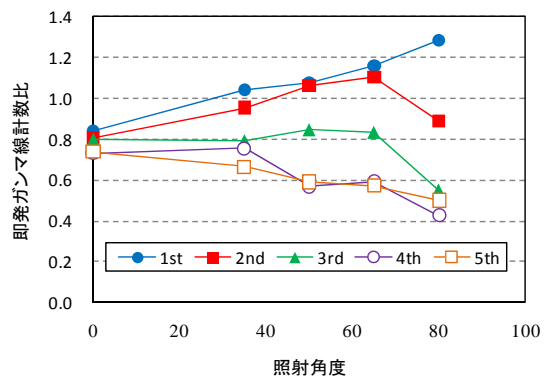


図-5 ピーク位置による試験結果

つきが大きい。そこで本研究では比較的精度よく定量評価できる範囲をモルタル板5枚とし、それを測定範囲と呼ぶこととした。表-1は、各ピーク位置の場所で、中性子線の通る軌跡がモルタル板内で最長になる照射角度を表したものである。図-5は変角照射試験の結果である。各ピークにおいて、表-1を参考にする照射角度で最大となる傾向が表れている。

表-2 各照射角度における照射位置とモルタル板の関係

照射角度	表面からの距離 (mm)				
	2.5	7.5	12.5	17.5	22.5
80°	1st	1st	1st	1st	1st
65°	1st	1st	2nd	2nd	2nd
50°	1st	1st	2nd	3rd	3rd
35°	1st	2nd	2nd	3rd	4th
0°	1st	2nd	3rd	4th	5th

次に、あらかじめモルタル板供試体により濃度分布を設定し計測した即発ガンマ線計数比の実測値をもとに、設定濃度を未知の値として推定を試みた。推定方法は、校正曲線に測定範囲を5分割した際の各分割部における濃度と距離情報を入力し、即発ガンマ線計数比の計算値を求めていく。求めた計算値と実測値を比較していき、実測値に計算値が最も近づくときの濃度を推定濃度として決定する。表-2に示すように照射角度80°で測定範囲内には全て1stのモルタル板であるので、次式によって塩化物イオン濃度 C_1 が得られる。

$$C_1 = \frac{R_{80}}{\sum_{i=1}^5 a \cdot e^{-bd_i}} = \frac{R_{80}}{a(e^{-2.5b} + e^{-7.5b} + e^{-12.5b} + e^{-17.5b} + e^{-22.5b})} \dots (2)$$

ここで、 R_{80} は照射角度80°で測定された計数比である。次に照射角度65°では1stと2ndのモルタル板であり、すでに1stのモルタル板の塩化物イオン濃度はわかっているので、次式によって塩化物イオン濃度 C_1 が得られる。

$$C_2 = \frac{R_{65} - aC_1(e^{-2.5b} + e^{-7.5b})}{a(e^{-12.5b} + e^{-17.5b} + e^{-22.5b})} \dots (3)$$

このように、照射角度50°、35°、0°と行っていくことによって、順番に3rd、4thおよび5thのモルタル板の塩化物イオン濃度を推定することができる。

図-5～9にモルタル板供試体の塩化物イオン濃度推定結果を示す。C-P1、C-P2、C-P4の場合はピーク位置をよ

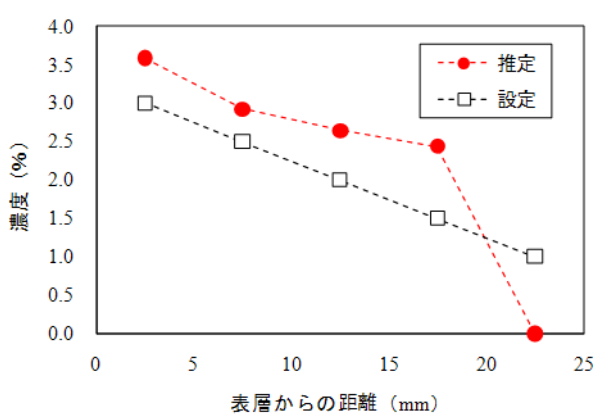


図-5 推定結果 (C-P1)

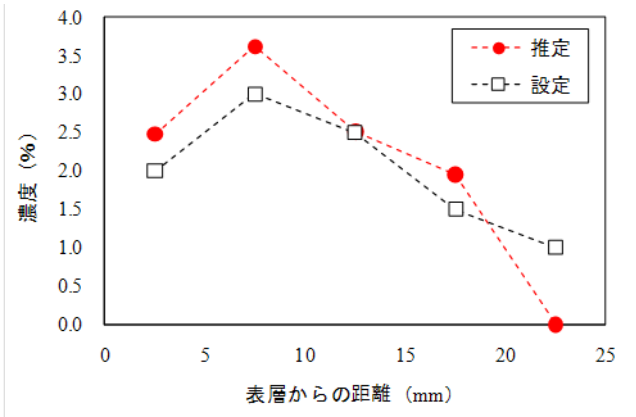


図-6 推定結果 (C-P2)

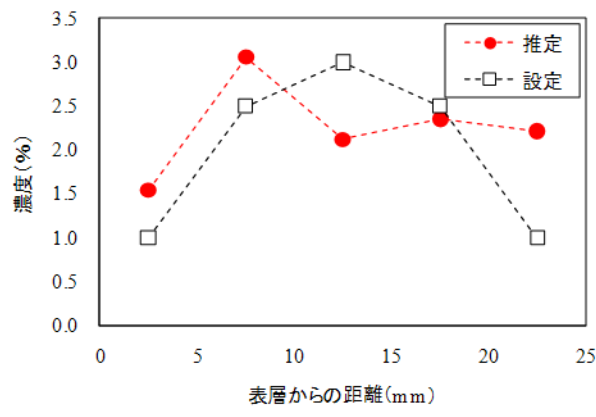


図-7 推定結果 (C-P3)

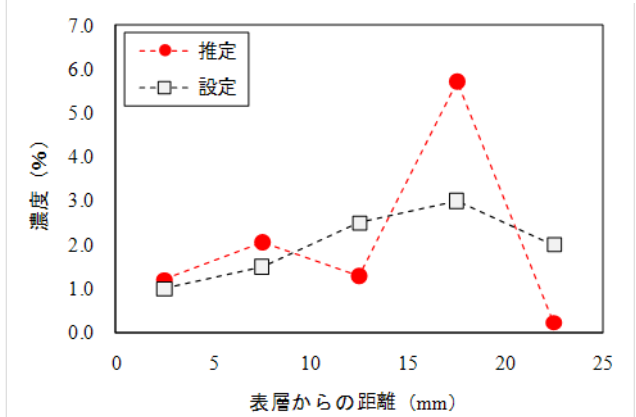


図-8 推定結果 (C-P4)

く捉えており、特にC-P1、C-P2においては推定濃度分布の形状が設定濃度分布の形状をよく表現している。C-P5の場合は、ピーク位置が厳密には一致していないが、表面からの距離が深部に向かうほど濃度が高くなるという分布形状は表現されている。従って、変角照射方法によって、即発 γ 線分析で濃度ピークが表層に存在しない場合でも、濃度分布を推定可能であると言える。ただし、C-P3の場合ではピーク位置にずれが生じており、ピーク位置と分布形状のいずれも同定できていない。C-P3の場合には図-5に示したピーク位置の結果においても、3rdでは照射角度 50° でピークとなるはずであるが明確なピークが現れていない。他のピークでの測定ではピーク位置を精度よく推定できているため、これは実測値の測定誤差が原因であると考えられる。本研究で提案する推定手法は、あらかじめ各設定角度で分析を行い計測された即発 γ 線計数比の実測値に対して、計算値が最も近い値となるように、各位置の塩化物イオン濃度を推定する方法である。したがって、参考となる実測値が本来測定されるべき真値から離れれば、それを参考にする計算値が影響を受けて推定濃度の精度低下に直結すると言える。実測値を測定する試験において測定時間を長くして精度を改善するか、測定を複数行い、ばらつきが最小となる実測値を取得する必要がある。さらに、比較的良く推定できているC-P1やC-P2においても推定結果は設定値に比べて過大評価している。これは測定範囲を超えた領域からも塩化物イオンに関する即発 γ 線が発生しており、実測された即発 γ 線計数比にはそれを含むこととなり、その結果推定された塩化物イオン濃度は設定値より過大な値となる。従って、推定精度を改善するためには測定範囲外からの即発 γ 線による計数比を適切に除外する必要があるが、上述したように測定範囲外からの計数比はバラツキため、補正方法については今後の課題である。

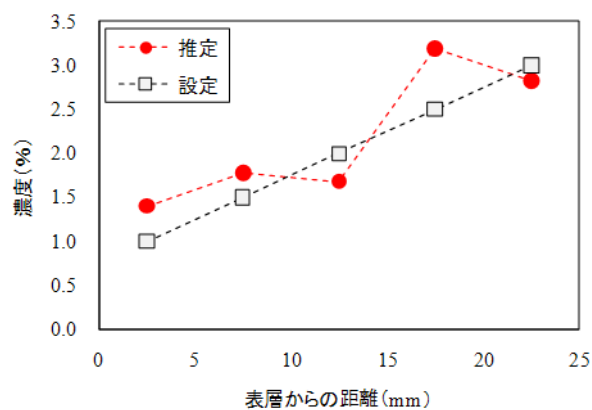


図-9 推定結果 (C-P5)

4. 結論

本研究は、即発ガンマ線分析を利用した塩化物イオン濃度分布の測定に関して、その手法の精度や適用性を向上させる検討を行った。得られた結果をまとめると以下の通りである。

はじめに、配合を変化させたモルタル供試体の測定により、測定対象物の W/C や骨材量など内部構造の影響が即発ガンマ線計数比の測定結果に与える影響について確認した。その結果、供試体の W/C や骨材量の変化があっても、同じ測定距離（測定範囲）で測定する限り、即発ガンマ線計数比の変動は極めて小さく同等の値であると言える。

また、あらゆる塩化物イオン濃度分布を対象とした変角照射試験による測定手法を提案した。任意の濃度を持たせて作製したモルタル板を組み合わせることで、濃度分布を再現した供試体を作製し、本手法を用いて濃度分布の推定を行った。その結果、推定された濃度は、設定された濃度分布形状を十分に表現しており、ピーク位置を捉えることができることがわかった。よって、変角照射試験を用いて、コンクリートの塩化物イオン濃度分布を非破壊で測定することが可能である。しかし、本手法を用いた推定濃度は設定濃度を過大評価する。これは、角度を変化させつつ測定することで、塩分を含む層を多く測定し実測値が増加することが原因である。今後、推定精度を改善するためには、測定時のばらつきを最小に抑える工夫を施すとともに、照射角度の変化に伴う実測値の増加現象に留意した補正を行う必要がある。

5. 引用(参照)文献等

- 1) 米沢伸一郎：原子炉中性子による即発 γ 線分析，分析化学，51，pp.61-96，2002。
- 2) H.H Saleh and R.A. Livingston: Experimental evaluation of a portable neutron-based gamma- spectroscopy system for chloride measurements in reinforced concrete, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol.244, No.2, pp.397-371, 2000.2
- 3) 山田耕大ほか：コンクリート中の塩化物イオン濃度分布の非破壊測定に対する即発ガンマ線分析の適用性について，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.757-762，2008