

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360207

研究課題名（和文） 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現場非破壊測定方法の開発

研究課題名（英文） Development of Non-destructive In-situ Measuring Method on Profile of Chloride Concentration in Concrete by Prompt Gamma-ray Analysis

研究代表者

氏家 勲（UJIKE ISA0）愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：90143669

研究成果の概要（和文）：本研究は中性子を試料に照射して放出されるガンマ線を測定すると多くの元素を同時に分析できる方法を利用して、ビーム状の中性子をコンクリートの表面に角度を徐々に変えて照射することにより、コンクリート構造物の塩害と呼ばれる鉄筋腐食による劣化の進行の予測に必要なコンクリート中の塩化物イオン濃度を非破壊で測定する方法を提案し、任意の塩化物イオン濃度分布に対して適用が可能で、その方法が妥当であることを示している。

研究成果の概要（英文）：This study uses analysis method that can identify a multi element at the same time from gamma rays discharged by irradiating the neutron to the sample. This study proposes the non-destructive method of measuring the profile of the chloride ion concentration in concrete necessary for predicting the progress of deterioration by the reinforcement corrosion of a concrete structure by gradually changing the irradiating angle of neutron beam to the concrete surface. The proposal method can apply to arbitrary distribution of the chloride ion concentration and is appropriate.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2010年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2011年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学、土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：維持管理・計測システム

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の劣化現象の中で最も関心が高いものは塩害による鉄筋腐食であり、塩害による劣化は腐食ひび割れが発生するまでは、外観観察のみでは劣化の潜伏期の進行を評価できない。塩害の進行を評価するためには、鉄筋周辺を含めてかぶりコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を知る必要がある。かぶりコンクリート中の塩化物イ

オン濃度はコア供試体やドリル穿孔屑を採取して調べるのが一般的である。しかしながら、これらの方法は手間がかかり、構造物に損傷を与え、同じ位置で何度でも測定できない。従って、コンクリート構造物の維持管理における診断技術において、非破壊検査であることが必須条件であると考えられる。

塩化物イオンの測定において、現場で試料を前処理することなく分析でき、作業効率の

改善やコストの削減が期待できる蛍光X線分析装置を用いた測定方法が開発されている。しかしながら、この方法ではコンクリート表面近くしか分析できないため、内部の鉄筋近傍を測定するためにはやはりコア供試体を採取する必要があり、コア供試体は破壊しないが構造物には損傷を与えてしまう。従って、コア供試体の採取も必要とせず、非破壊でかぶりコンクリート中の塩化物イオンの深さ方向の濃度分布を測定する方法の開発が強く望まれていた。

2. 研究の目的

本研究は即発 γ 線分析によりコンクリート内部の塩化物イオンの濃度分布を測定する技術を、現場での非破壊計測方法に発展させることが目的である。現場計測を可能とするため、移動可能な中性子線源であるカリフォルニウムを用いて、コンクリート内部の塩化物イオンの濃度分布の測定について検討する。カリフォルニウムからあらゆる方向に出ている中性子を原子炉からの中性子ビームと同じように所定の測定位置に照射する方法を検討する。さらに、即発 γ 線のエネルギースペクトルを得るためにはGe検出器が用いられるが、現場計測での取り扱いやすさとGe検出器に比べて安価であることを考慮して、エネルギー分解能は劣るがNaI検出器を用いた即発 γ 線分析を行い、耐久性診断に利用できる精度を確保して塩化物イオンの濃度分布の測定をする方法を検討する。

3. 研究の方法

(1) 中性子ビームをコンクリート試料に照射し、Ge検出器を用いて即発 γ 線分析により塩化物イオンを定量分析する方法において、ダミー試料を段階的に薄くすることおよび中性子ビームの照射角度の変化により、対象コンクリート内部の塩素イオン濃度分布がある程度の精度で評価できる方法について検討する。

(2) カリフォルニウムの線源強度とそれからの中性子のコンクリートへの有効透過深さの関係を検討する。中性子はコンクリートを透過するが、散乱などにより徐々に減衰し、即発 γ 線のカウント比も減少する。現場計測を考慮してカリフォルニウムとGe検出器を用いて中性子ビームと同じようにコンクリート中の塩化物イオンの測定することを検討する。

(3) カリフォルニウムを用いて、中性子の照射ホルダーを作製する。カリフォルニウムからはあらゆる方向に中性子が放出しているので、吸収材を用いて中性子線源ホルダーを作製する。ホルダー内部の形状は所定の位置や範囲に中性子が照射されているかを検討して、決定する。塩化物イオン濃度が異なる

試料に対して、ホルダーを所定の間隔ごとに移動させて即発 γ 線を測定し、塩化物イオン濃度を定量分析する。同じ計測を中性子の照射範囲が設定できる中性子ビームを用いて行い、両者の結果を比較して、ホルダーからの中性子の照射範囲を把握する。

4. 研究成果

(1) 即発ガンマ線計数比と塩化物イオン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。図-1はCase Aは5枚のモルタル版全てに塩化物を含ませたものであり、Case Bは1枚だけ塩化物を混入し、そのモルタル版の位置を奥に移動した結果である。1枚目(1st)から奥に行くにつれて塩分濃度は同じでも、即発 γ 線計数比は低下している。

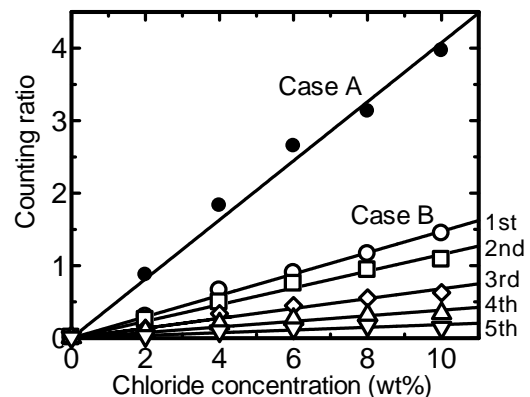


図-1 即発 γ 線計数比と塩化物イオン濃度の関係

(2) 即発 γ 線計数比に関して重ね合せの原理が成り立つ。図-2のCase AはCase Bを合計したもので、Case Cは2、4、6、8、10%の塩化物を含むモルタル版を任意に組み合わせ測定し結果と位置と濃度がわかっているので対応するCase Bの測定結果を合計したものを比べたものである。一緒に測定した

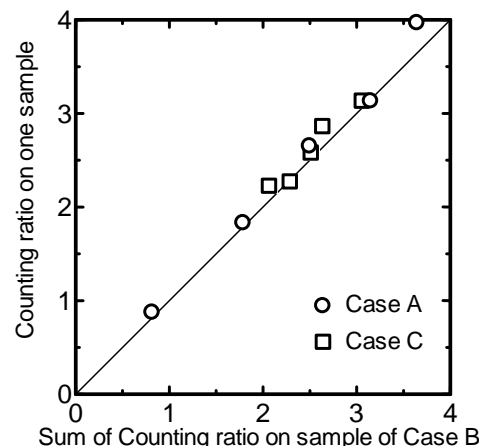


図-2 即発 γ 線計数比に関する重ね合わせの関係

ものと個別に測定して合計したものがよく一致いる。この重ね合せの原理を用いて表面からの塩化物イオンの濃度分布を推定する方法を提案する。

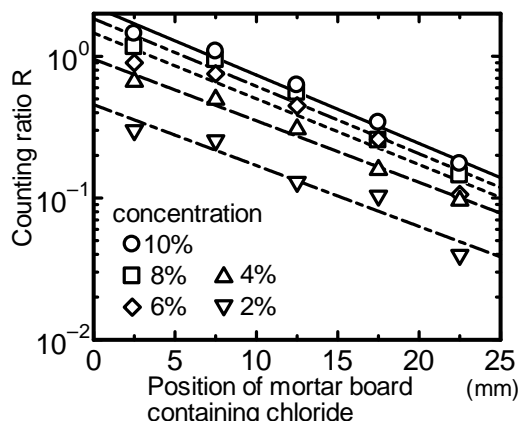


図-3 校正曲線の例

(3) 塩化物イオン濃度分布を推定するために、測定対象物内部に含まれる塩化物イオンの濃度および位置による影響を考慮した次式による校正曲線を提案した。

$$R = aC \cdot e^{-bh}$$

ここで、 R ：即発 γ 線計数比、 C ：塩化物イオン濃度、 h ：表面からの距離である。係数 a および係数 b は中性子源、測定装置や測定時

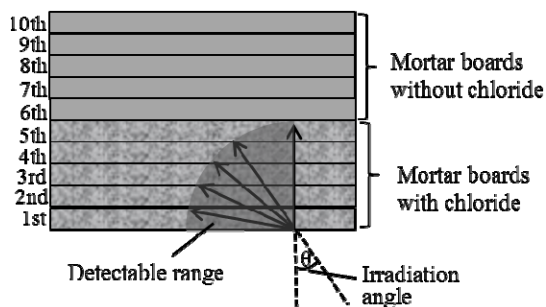


図-4 照射角度を変化させる方法

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。図-3は校正曲線の一例を示す。一つの塩化物イオン濃度に関して係数 a 、係数 b を求めれば、その他の塩化物イオン濃度に関しても適用できる。

(4) 塩化物イオン濃度分布の評価方法

①提案方法の概要

本研究では中性子ビームの照射角度を徐々に変化させて即発 γ 線計数比を測定する方法を提案している。

中性子はコンクリート表面から内部へ透過して侵入し即発 γ 線が発生する。しかしながら、深部から発生する即発 γ 線は微量でノイズとして計測される値と区別できない。そ

こで本研究は塩化物イオンの濃度が比較的適切に測定できる深さを測定範囲と定め、それより深部からの即発 γ 線はノイズとした。計測条件に依存するが、本研究で図-4に示すように5mm間隔で区切り、25mmを測定範囲とした。

②表面部に塩化物イオン濃度の最大値がある場合の評価方法

一般にコンクリート構造物のかぶりコンクリート内の塩化物イオン濃度は表面部が最大で表面から奥に進むにつれて小さくなっている。そしてその塩化物イオン濃度分布をフィックの拡散方程式から得られる誤差関数を用いて表している。

そこで、本研究で提案して中性子ビームの照射角度を表面に対して段階的（今回の実験条件では 10° 、 25° 、 40° 、 55° 、 90° の5段階）に大きくし最終的に表面に直角とする。照射角度が大きくなるに即発 γ 線計数比が段階的に減少する場合は表面に濃度の最大値がある場合であり、照射角度 10° の場合の計測された即発 γ 線計数比と校正曲線から表面部の塩化物イオンが求まる。そして、表面部の値を出発点として深部に向けて誤差関数による分布を設定し、その位置の濃度から校正曲線を用いて即発 γ 線計数比を求め合計する。その合計した即発 γ 線計数比と中性子ビームの照射角度 90° の測定値と比較検討し、合計値が実測値より小さい場合にはもう5mm深く侵入している塩化物イオン分布を設定し、即発 γ 線計数比の合計値を求める。これを繰り返して、実測値に最も近いとなった場合に、その時の設定した塩化物イオンの

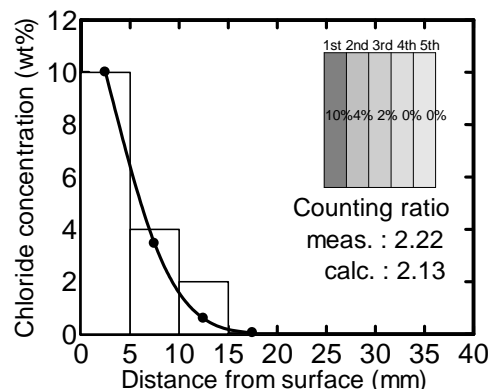


図-5 表面部に最大値がある場合の評価結果の一例

濃度分布が評価結果となる。

③任意の塩化物イオン濃度分布の場合の評価方法

コンクリート構造物のかぶりコンクリートの塩化物イオン濃度は基本は②で述べたように内部に行くほど小さくなる分布を形成する。しかしながら、降雨の影響や中性化の進行の影響により、表面より少し深部に入

表一 1 照射角度と測定範囲

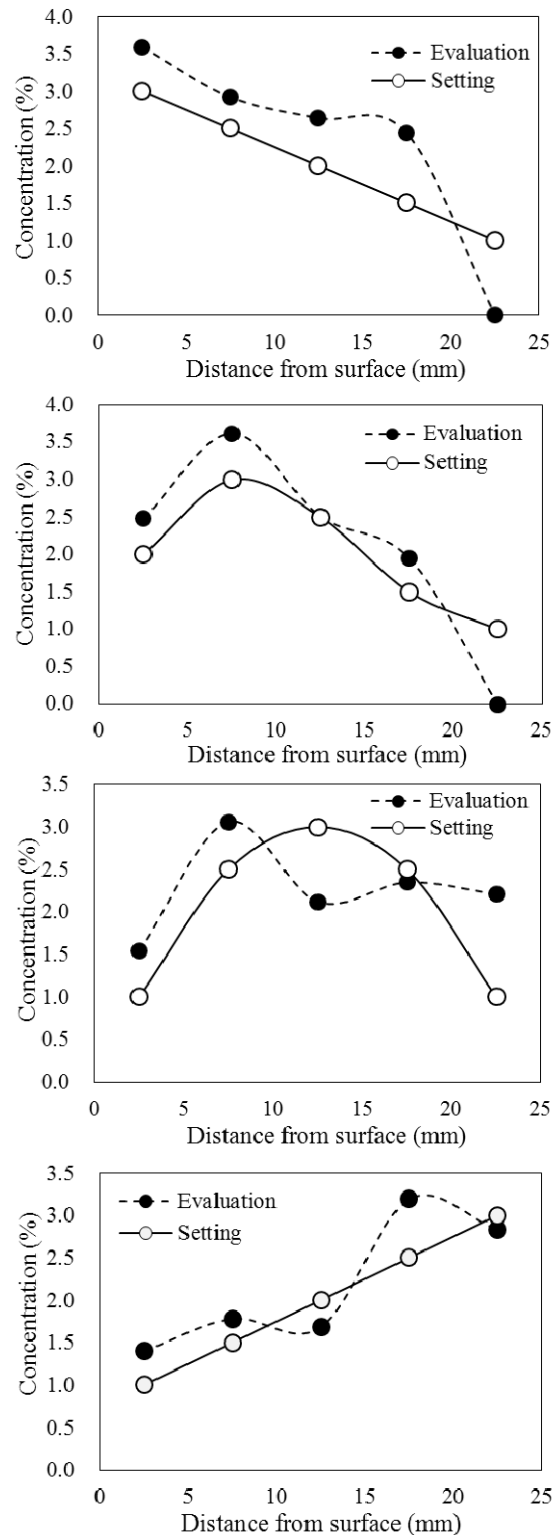
Angle	Distance from surface (mm)				
	2.5	7.5	12.5	17.5	22.5
10°	1st	1st	1st	1st	1st
25°	1st	1st	2nd	2nd	2nd
40°	1st	1st	2nd	3rd	3rd
55°	1st	2nd	2nd	3rd	4th
90°	1st	2nd	3rd	4th	5th

った位置で塩化物イオン濃度が最大となる場合がある。そのような場合には②の方法を適用すると評価値と実測値の差が大きくなる。そこで、表一 1 に示すように、照射角度を段階的に大きくすると、測定範囲も段階的に広がる。従って、表面から順次、既知の値の塩化物イオン濃度に対応する即発 γ 線計数比を差し引けば、残りの即発 γ 線計数比は未知の塩化物イオン濃度に対応する。例えば、照射角度 0° においては表面部の 1 番目の測定範囲のみの塩化物イオンが関係するので表面からの距離を 2.5mm として、測定された即発 γ 線計数比を用いて校正曲線から、1 番目の塩化物イオン濃度が求まる。次に、照射角度 25° においては測定範囲 1 番目と 2 番目を含んでおり、1 番目の塩化物イオン濃度は既知であり、表面からの距離もわかっているので、校正曲線から即発 γ 線計数比が分かり、実測された即発 γ 線計数比から差し引けば、残りは 2 番目の塩化物イオンからのものとなる。2 番目の測定範囲の表面からの距離は分かっているので、2 番目の塩化物イオン濃度を求めることができる。これを繰り返すと測定範囲全ての塩化物イオン濃度分布を推定することができる。

図一 6 は推定値と設定値を比較したものを示す。塩化物イオン濃度分布の形状は概ねよく評価できていると思われる。ただし、表面近くの塩化物イオン濃度を少し過大評価している。一方深部における推定値は過小評価する機会が多い。表面近傍における過大評価は測定範囲以外からの即発 γ 線の影響によるものである。すなわち、上述しているが測定範囲は比較的明確に塩化物イオン濃度と即発 γ 線計数比が比例関係にある範囲であり、実測される即発 γ 線計数比には測定範囲外からのノイズを含んでいる。そのために過大評価することとなる。そして、この過大評価した値による即発 γ 線計数比を深部の塩化物イオンの推定では差し引くので、深部では過小評価することとなる。

(5) 今後の展望

社会基盤施設であるコンクリート構造物を非破壊で検査する方法、特にコンクリート構造物の劣化現象を推定するために必要な情報が得られる方法は今後ますます重要である。本研究では上述のように中性子ビーム



図一 6 推定値と設定値との比較

の照射角度を変えることにより、徐々に測定範囲を供試体の表面から深くすることにより、任意の塩化物イオン濃度の分布を評価することができる方法を提案した。本研究の成果で提案している方法は世界的にも先駆的なものがある。ただし、中性子ビームの照射角度を変える方法においては、精度を改善する

ためには、測定値に含まれるノイズの影響を適切に考慮する必要がある。このノイズの考慮について、ノイズが測定値の何%あるかなどのデータを蓄積すれば、本提案する方法の信頼性が向上すると考えられる。

また、この方法を現場計測に発展させる必要があり、現場計測への展開は本研究の目的であった。本研究では中性子ビームでなく水分計などで使用されているカリフォルニウムを用いて塩化物イオンの測定を試みた。しかしながら、種々の工夫を試みたが、水分計などで用いられているカリフォルニウムは移動に関しては問題ないが、中性子の強度が弱く、塩化物イオンの測定には適さないことが分かった。米国でコンパクトな携帯用中性子ジェネレーターが開発されており、その携帯用中性子ジェネレーターを用いた実験はできなかったが、即発γ線によるコンクリート中の塩化物イオン分析の第一人者との議論から本研究で提案する中性子ビームの角度を変える方法は携帯用中性子ジェネレーターにも適用可能であることを確認することができた。従って、日本においても携帯用中性子ジェネレーターなどの移動可能な中性源が開発されれば、本研究の成果を現場計測に展開できると考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

1) A Study on Non-destructive Measurement Using Prompt Gamma-ray Analysis of Chloride Profile in Concrete, Isao UJIKE, Shinichiro OKAZAKI, Michiyo YAMATE and Hideaki MATSUE, Proc. of the 4th International Conference on Concrete Repair, pp.405-412, 2011.

2) A fundamental study on non-destructive measurement of chloride concentration in concrete by Prompt Gamma-ray Analysis, Isao UJIKE, Shinichiro OKAZAKI, Michiyo YAMATE Michiyo and Hideaki MATSUE, Proc. of the 6th International Conference on Concrete under Severe Condition, pp.1197-1204, 2010.

3) 即発ガンマ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に関する研究、山田耕大、氏家勲、岡崎慎一郎、松江秀明、日本コンクリート工学年次論文集、Vol. 31、No. 1、pp. 1981-1986、2009.

[学会発表] (計3件)

1) 即発ガンマ線分析によるコンクリートの塩化物イオン濃度分布の測定に関する基礎的研究、村上展将、氏家勲、岡崎慎一郎、山手望知世、土木学会四国支部、香川大学(高

松市)、2011. 5. 14

2) 即発γ線分析を用いたコンクリートの成分分析に関する基礎的研究、山手望知世、氏家勲、岡崎慎一郎、松江秀明、土木学会年次学術講演会、北海道大学(札幌市)、2010. 9. 1

3) 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、木下雄司、山田耕大、氏家勲、岡崎慎一郎、土木学会四国支部、徳島大学(徳島市)、2009. 5. 16

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ

<http://www.cee.ehime-u.ac.jp/~zairyu/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

氏家 勲 (UJIKE ISAO)
愛媛大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：90143669

(2) 研究分担者

岡崎 慎一郎 (OKAZAKI SHINICHIRO)
愛媛大学・大学院理工学研究科・講師
研究者番号：30510507