

論文 即発 γ 線分析によるコンクリートの配合推定に関する基礎的検討

岡崎 慎一郎^{*1}・氏家 勲^{*2}・山手 望知世^{*3}・松江 秀明^{*4}

要旨：非破壊で試料の多元素同時定量が可能な即発 γ 線分析手法を用いて、コンクリートの配合推定を行った。種々の配合のモルタル供試体を用いて検量線を作成し、それを基にコンクリートの円柱供試体の打設面から深さ方向へ1cmピッチの局所的な水セメント比を推定した。その結果、低水セメント比においては、示方配合による水セメント比とおよそ一致したことが確認された。

キーワード：即発 γ 線分析, 配合推定, 水量指数法

1. はじめに

我が国における社会基盤ストックは主としてコンクリートが用いられている。コンクリート構造物は外力の作用や有害物質の侵入によってその構造性能と耐久性が劣化するため、構造物を一定の期間安全に使用するためには、コンクリートの品質やコンクリートの有する健全性の検査・診断を実施し、適切なメンテナンスを施すことが必要不可欠である。

コンクリートの強度および物質移動抵抗性はコンクリートの水セメント比が支配要因のひとつである。これを知ることが、既設構造物の高精度な品質評価に資することができるため、硬化コンクリートの配合を推定する技術は、社会基盤の維持管理に重要とされている。

コンクリートの配合推定法は、セメント協会法¹⁾、ASTM法²⁾、水量指数法³⁾など数多く提案されているが、いずれもコアを採取ののち、試料の調製を要する破壊試験であるため、構造コンクリートに損傷を与えない手法による配合推定手法の確立は、構造物の耐久性維持と検査に要するコストの低減の観点から極めて重要であると考えられる。

そこで本研究では、即発 γ 線分析という非破壊検査手法の、配合推定への適用に関する基礎的な検討を、精度の観点から行ったものである。即発 γ 線分析は透過性にも優れているため、表層からコンクリート内部の情報をも取得できる可能性をも有しており、本手法の実用化は耐久性診断の大きな進歩となりうるであろう。

2. 即発 γ 線分析

2.1 即発 γ 線分析の原理

図-1に即発 γ 線分析の概念図を示す。中性子の線源から放出される高速中性子を減速させることにより熱中性子がつくられる。これを対象物質の標的核種に当てる

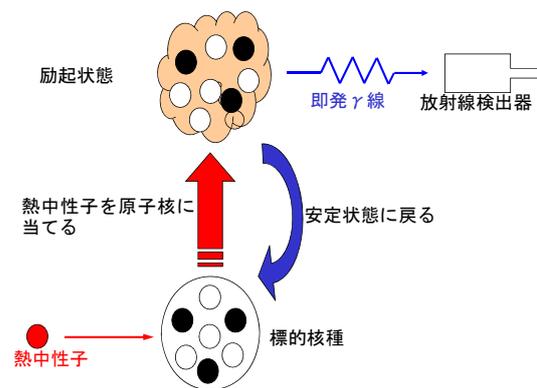


図-1 即発 γ 線の原理

と原子核反応が起こり、原子核が励起状態となって即発 γ 線が放出される。その γ 線のエネルギーを分析することによって元素の定量分析が可能となる。これを即発 γ 線分析と呼ぶ。多元素同時分析が可能という特徴がある。

2.2 即発 γ 線分析のコンクリートへの適用例

即発 γ 線分析のコンクリートへの適用の利点として、試料の調整が不要であること、 γ 線がコンクリート中を透過するためコンクリートの深部の情報を非破壊で取得できること、さらに中性子をビーム状にして照射するので局所分析が可能である点が挙げられる。

図-2にセメント、細骨材およびコンクリートの即発 γ 線スペクトルの一例を示す。横軸は γ 線エネルギーを、縦軸は計数を示している。あらゆる元素それぞれ固有の γ 線エネルギーを有しているため、 γ 線エネルギーと計数から元素分析が可能となるのである。著者らはこれまでに、鉄筋コンクリートの腐食の要因となる塩化物イオン濃度を、測定されたCaとClのピークの比と、あらかじめ設定された較正曲線を用いて、推定することに成功した⁴⁾。さらに、コンクリート中に不均一に分布する塩化物イオン濃度を、表層からの中性子照射のみで同定するこ

*1 愛媛大学大学院 理工学研究科生産環境工学専攻環境建設工学コース助教 博(工) (正会員)

*2 愛媛大学大学院 理工学研究科生産環境工学専攻環境建設工学コース教授 博(工) (正会員)

*3 愛媛大学大学院 理工学研究科生産環境工学専攻環境建設工学コース

*4 日本原子力研究開発機構 理学博士

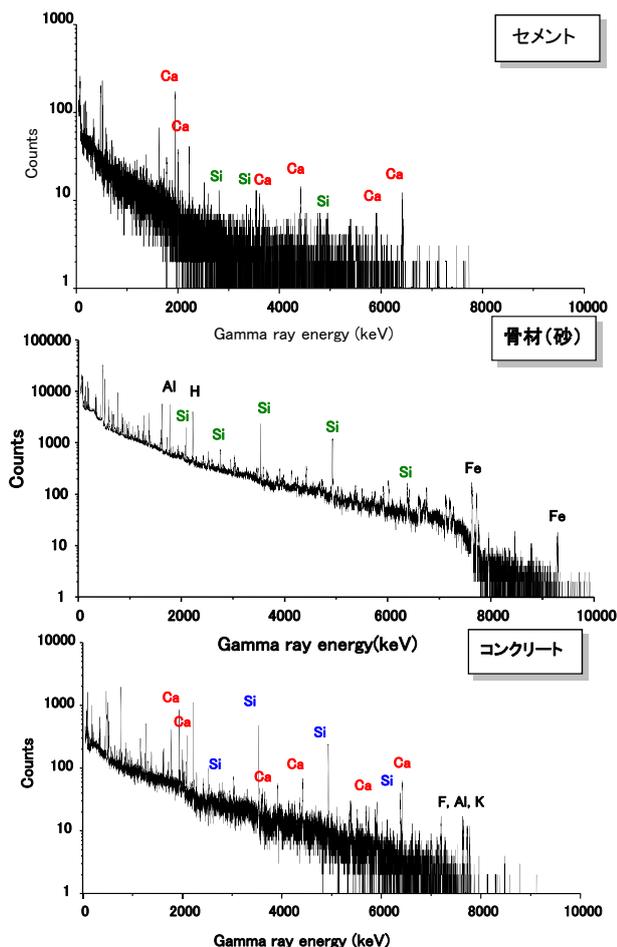


図-2 即発γ線スペクトル

とも成功している⁵⁾。本論文では、Ca と Si のピークに着目して、計数からコンクリートの配合を推定することを目的としている。

3. 研究の方法

はじめに種々の配合のモルタル供試体を対象に即発γ線分析を行い、検量線を作成する。その検量線を使用して、示方配合で水セメント比が40%、65%のコンクリートを対象に配合推定を実施する。推定結果の検証には、示方配合での水セメント比、および水量指数法による水セメント比の推定結果を用いる。

4. モルタル供試体を対象とした実験と検量線の作成

4.1 実験概要

本実験では日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 に設置されている即発ガンマ線分析装置を用いて行った。この分析装置では炉心から熱中性子を中性子ガイド管で導くことによって中性子をビーム状で用いることができる。ビーム形状は約 2.0cm×2.0cm であり、中性子束は約 10^8 n/cm²・s である。中性子ビームは直径 5mm の円形に絞って使用した。中性子ビームの照射により試料から放出される即発ガンマ線を、ビーム入射方向に対

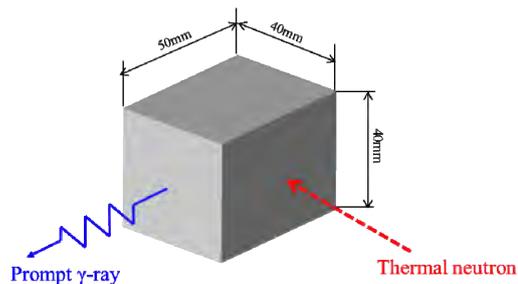


図-3 供試体寸法とビーム照射位置

表-1 モルタル板の示方配合

ケース名	W/C(%)	S/C(%)
W/C40-S/C44	40	44
W/C40-S/C102		102
W/C50-S/C0	50	0
W/C50-S/C50		50
W/C50-S/C76		76
W/C50-S/C100		100
W/C50-S/C150		150
W/C50-S/C200	60	200
W/C60-S/C50		50
W/C60-S/C108		108

して直角方向に設置された高純度ゲルマニウム検出器で検出する。

はじめに種々の配合のモルタル供試体を用いて、即発γ線スペクトルの特徴を確認した。モルタル供試体による実験には普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)、細骨材には豊浦標準砂(表乾密度 2.64g/cm³)を使用した。表-1 に本研究で用いたモルタルの配合を示す。水セメント比は 40, 50, 60(%)の3水準、S/Cは表の通り 0%から 200%までの値を設定した。供試体のサイズは 4cm×4cm×5cm であり、図-3 のように供試体の側面から中性子を透過させ、即発γ線スペクトルを得た。

配合推定にはコンクリート中に主として含有されている Ca の計数と Si の計数に着目した。スペクトル中には Ca と Si の示すピーク位置が複数存在する。本研究では Ca のピーク位置として 1942keV、Si のピーク位置として 3540keV の値を採用した。

図-4 に単位セメント量と Ca 計数の関係、図-5 に単位セメント量と Ca 計数の関係を示す。両グラフ共に単位量の増加に伴って線形に計数が増加していることが確認される。また、図-5 の単位骨材量と Si 計数の関係において、ケース W/C50_S/C0 が示すプロット、つまり骨材の含まないセメントペースト供試体においても Si

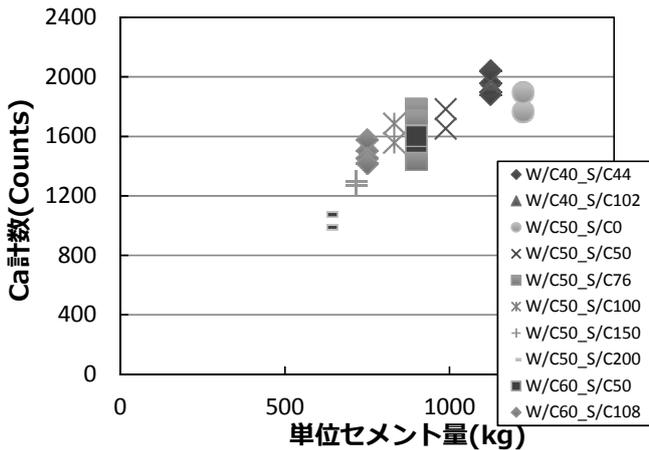


図-4 単位セメント量と測定されたCa計数値

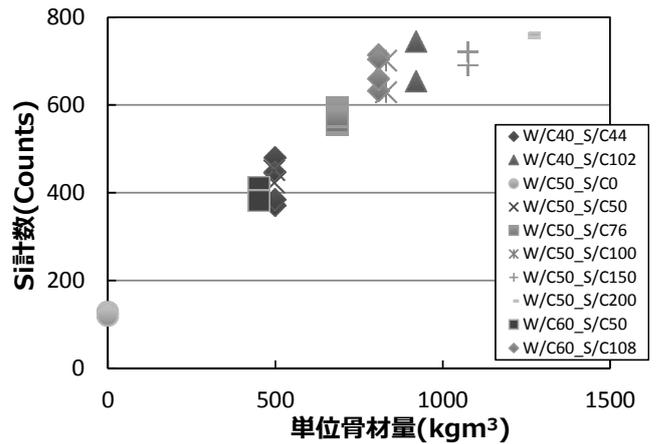


図-5 単位骨材量と測定されたSi計数値

計数がカウントされている。これはセメント中のSi元素が計測されたものである。

4.2 配合推定法の検討

ここで、配合推定に必要な検量線の作成方法について検討する。骨材は石灰岩由来ではないため、Caが含まれないと仮定すると、測定されたCa計数はセメント由来のものとして推定することができる。つまり、図-4に示す単位セメント量とCa計数の関係を一对一に規定できる検量線を設定すると、コンクリートに即発線照射して得られるCa計数から単位セメント量を推定することが出来る。切片が0とした線形近似により、単位セメント量とCa計数に関する以下の式を得た。なお、決定係数は $R^2=0.66$ であった。

$$C^*=a \times \chi \quad (1)$$

ここに、 a ：中性子発生装置の出力、供試体の厚みに依存する係数であり、本試験では $a=0.569$ 、 C^* ：推定された単位セメント量、 χ ：計測されたCaの計数である。

次に単位骨材量の推定を検討する。図-5に示したSi計数は、骨材およびセメント由来のSi計数が含まれる。先程の検討においてセメントの単位量が推定されたので、この結果を使用して骨材由来のSi計数を算出する。ケースW/C50_S/C0の結果を用いると、以下の式により1kgあたりのセメントに含まれるSi計数 $\sigma_{\text{cement}}/C^*$ が算出される。

$$\sigma_{\text{cem}}/C = \sigma_0/C_0 \quad (2)$$

ここに、 σ_{cem} ：単位セメント量あたりの、セメント由来のSi計数値、 σ_{cem}/C ：セメント1kgあたりのSi計数値であり、本計測においては0.106、 σ_0 ：骨材を含まないセメントペーストにおけるSi計数値、 C_0 ：骨材を含まないセメントペーストにおける単位セメント量の示方配合での値である。各ケースにおいて、 σ_{cem}/C^* を推定された単位セメント量に乗ずると、 σ_{cem} が求められる。

この値を図-5におけるSi計数から減ずる、つまり以下

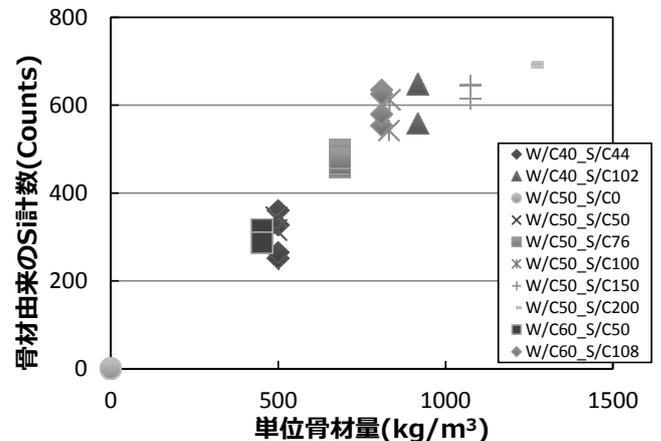


図-6 単位骨材量と骨材由来のSi計数の関係

の式を施すと骨材由来のSi計数が算出される。

$$\sigma_{\text{agg}} = \sigma - \sigma_{\text{cem}} \quad (3)$$

ここに、 σ_{agg} ：骨材由来のSi計数値、 σ ：モルタル供試体のSi計数値である。単位骨材量と骨材由来のSi計数値の関係を図-6に示す。この関係を線形近似し、切片を0とすると、以下の式が得られた。なお、近似直線の決定係数は $R^2=0.90$ であった。

$$S^*=b \times \sigma_{\text{agg}} \quad (4)$$

ここに、 b ：中性子発生装置の出力、供試体の厚みに依存する係数であり、本試験では $b=1.56$ である。以上整理すると、Ca係数からセメントの単位量が推定され、Siの計数値から単位セメント量に含まれるSi計数値を減じることによって、骨材由来の計数値が求まり、単位骨材量が推定される。以上の手順で得られた2本の近似直線を検量線とする。

4.3 中性子源の出力の大きさが検量線に与える影響

試験に用いた中性子源の出力は種々の影響を受けるため、試験実施日によって検量線の係数値が異なる。そ

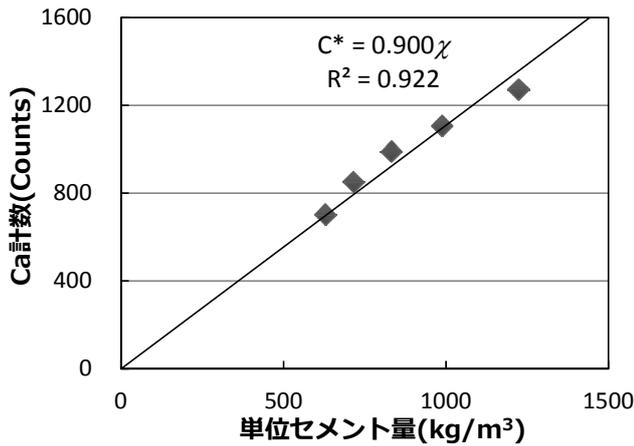


図-7 単位セメント量と Ca 計数値

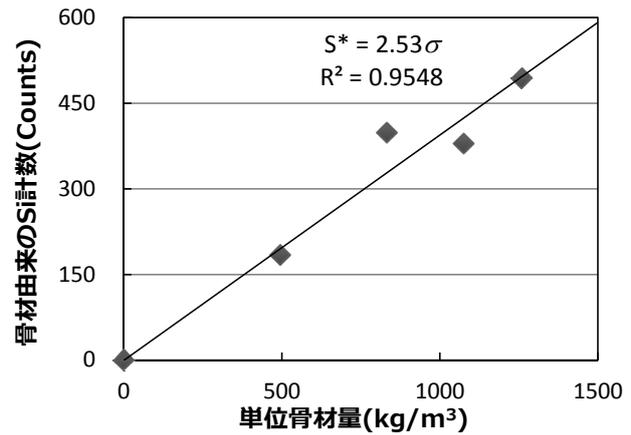


図-8 単位骨材量と Si 計数値

のためコンクリートの配合推定の前に検量線を求めるための予備実験を実施する必要がある。

そこで、W/C=50%で S/C=0, 50, 100, 150, 200 の 5 体を 4.2 節の実験日以降に同じ条件において追試を行い、それぞれ 5 点のプロットから検量線を作成した。単位セメント量と Ca 係数、および骨材由来の単位骨材量と骨材由来の Si 係数の関係を図-7、図-8 に示す。なお、式(1)および式(4)の係数はそれぞれ $a=0.900$ 、 $b=2.53$ と決定された。

4.4 単位水量の算出法および水セメント比の算出法

検量線の作成に用いたモルタル供試体の配合推定を行い、特に水セメント比の推定結果と示方配合における水セメント比の比較を行うこととする。以下、単位水量の算出法について説明する。即発γ線計数値から 1m³ 中のセメント量 C*が式(1)から、骨材量は式(4)から推定される。単位水量は、1m³ 空間からセメントの体積、骨材の体積および空気量を除いた体積に、水の密度を乗じる以下の式によって推定される。

$$W^* = \rho_w(1000 - C^*/\rho_c - S^*/\rho_s - V_a) \quad (5)$$

ここに、W*：推定された単位水量、 ρ_w ：水の密度、 ρ_c ：セメントの密度、 ρ_s ：細骨材の密度、 V_a ：モルタル中の空気量である。これらの値をもとに、推定された水セメント比 W*/C*を算出する。モルタル中の空気量は即発γ線分析では推定することができないため、 $V_a=5\%$ と仮定した。表-2 に推定された水セメント比を示す。W/C50_S/C100 以外は高い精度で推定されているため、 $V_a=0\%$ との仮定は妥当であったことが確認された。また、W/C50_S/C100 の推定結果が配合よりも過小評価された理由としては、図-8 における W/C50_S/C100 の点(単位骨材量が 831kg/m³ に存在する点)が検量線よりも上方にあり、骨材量が過大評価され、式(5)で算出される単位水量の推定値が過小に評価されたため、水セメント比が小さくなったことによることが原因と考えられる。

表-2 水セメント比の推定結果

ケース名	C* (kg/m ³)	S* (kg/m ³)	W* (kg/m ³)	S*/C* (%)	W*/C* (%)
W/C50_S/C0	1144	0	637	0	0.557
W/C50_S/C50	998	467	505	0.468	0.506
W/C50_S/C100	890	1007	333	1.131	0.374
W/C50_S/C150	765	959	391	1.253	0.511
W/C50_S/C200	633	1249	323	1.973	0.51

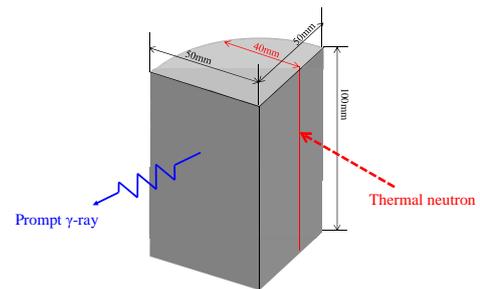


図-9 供試体のサイズとビーム照射位置

5. コンクリートの配合推定

5.1 材料及び配合

4.3 節で決定された係数をもつ検量線を用いて、コンクリートの配合推定を行った。表-3 にコンクリートの示方配合を示す。実験には普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)、細骨材には佐賀県唐津市産の海砂(表乾密度 2.58g/cm³、粗粒率 2.5)および愛媛県西条市丹原町産の砕砂(表乾密度 2.58g/cm³、粗粒率 2.8)を、粗骨材には愛媛県東温市山之内産の碎石(表乾密度 2.62g/cm³、実積率 59.5%)である。粗骨材の最大寸法は 20mm、混和材として AE 減水剤を使用した。

水セメント比は 40, 65% の 2 種類であり、直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体の上面から 2 層に分けて当該のコンクリートを打ち込んだ。打ち込み後 3 日後に脱型し、封かん養生を 28 日間施したのちに封かんを解き、およそ 2 年経過気中に暴露した。その後、表層から 10cm の位置を湿式カッターで切断し、さらに図-9 のように

表-3 コンクリートの示方配合

組骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
20	12	40	5	38.9	177	443	664	1022	5.32
20	12	65	5	45.5	168	258	834	1006	2.71

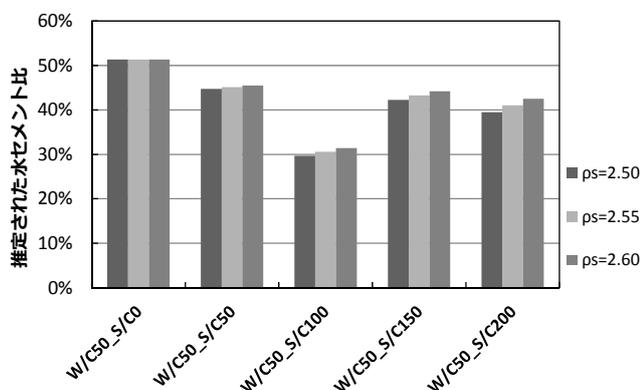


図-10 骨材密度を変化させたときの水セメント比の推定結果

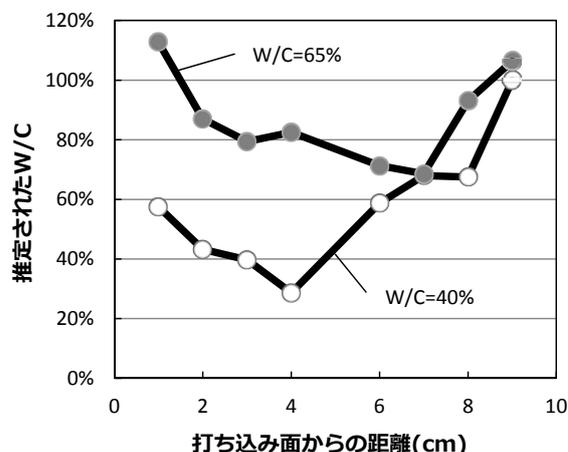


図-11 水セメント比の配合推定結果

供試体を4等分したのち、供試体の側面からビーム透過厚さが4cmとなる部分を、表層から深部へ向かう方向へ1cmずつ移動させて、深さ方向1cmごとの即発γ線スペクトルを得た。

5.2 コンクリートの配合推定手法

コンクリートとモルタルとは異なり、粗骨材を含むためコンクリートの配合推定手法を確立させるためには、粗骨材の扱いについての検討を加えなければならない。

本研究で使用した粗骨材は、細骨材と産地および密度が異なる。産地が異なるものの、主成分は主としてシリカであると考えられることから、粗骨材において着目すべき即発γ線スペクトルはモルタル同様にSi計数である。このため、細骨材と粗骨材の分離抽出が即発γ線分析では不可能であることを意味する。しかしながら、細骨材と粗骨材の密度が異なれども、その差がわずかであり、水セメント比の推定結果に与える影響が小さいこと確認できれば、細骨材と粗骨材を分離せずに同一の密度を用いて、骨材の総量として推定が可能となると考える。そこで、骨材密度の相違が水セメント比の推定結果に与える影響を検討した。4.3節で使用したモルタルを対象に、骨材密度を2.50、2.55、2.60と仮定した場合において、推定された水セメント比の感度分析結果を図-10に示す。骨材密度の相違の影響を最も受けるW/C50_S/C200の場合においても、推定された水セメント比は47.4%~50.4%程度の範囲で変動するため、骨材密度が推定結果に与える影響は限定的であると考えられる。よって、本研究では、モルタル供試体で得られた検量線を用いて、コンクリートの骨材の総量を推定することとした。

5.3 配合推定結果

図-11に配合推定結果を示す。水セメント比が40%と65%の供試体の両者ともに、推定値は示方配合の値よりも水セメント比を過大評価している。これは単位水量を過大評価したためであると考えられる。高水セメント比では、単位セメント量を過小評価、もしくは単位水量を過大評価しているためと考えられる。この要因としては、高水セメント比のコンクリートは空隙率が高いため、ビーム透過厚さは4cmであっても、実質透過したセメントもしくは骨材のマトリックス部分は4cmよりも薄く、このため計測された計数が小さくなったと考えられる。即発γ線により、高水セメント比と推定された場合は、高水セメント比のモルタル供試体を用いて作成された検量線を用いて再評価すれば、精度が向上すると考えられる。

また、両供試体ともに表層から深部に向かって推定値が低下し、その後増加している。これは、コンクリートを円柱モールドに2層に分けて打ち込んだ際、下層打ち込みの時にブリーディング水が上昇し、下層と上層の打ち重ね面に水が残ったために表層から10cm付近の水セメント比が大きくなり、また自重による圧密とブリーディング水の影響で表層付近の水セメント比も大きくなったと推察される。また、水セメント比40%の供試体の場合では特にこの部分において極めて水セメント比が高くなっていることが確認されたが、これは後述の水量指数法による推定においても同様の傾向が確認されたことから、ブリーディングの影響のほかに、この部分に打ち込んだコンクリートの水セメント比が局所的に高いことに起因すると思われる。

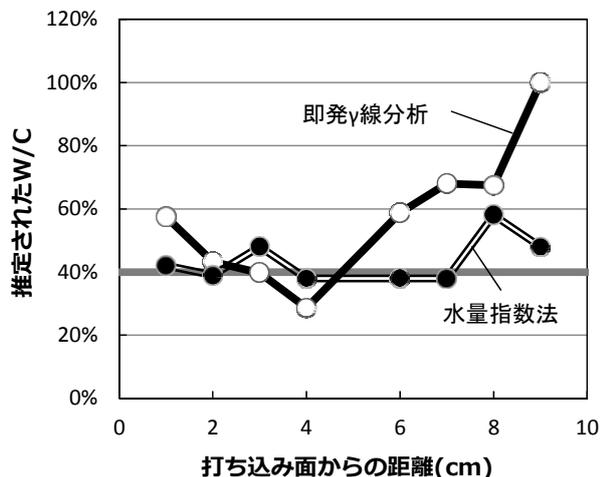


図-12 水量指数法による推定結果との比較 (W/C=40%)

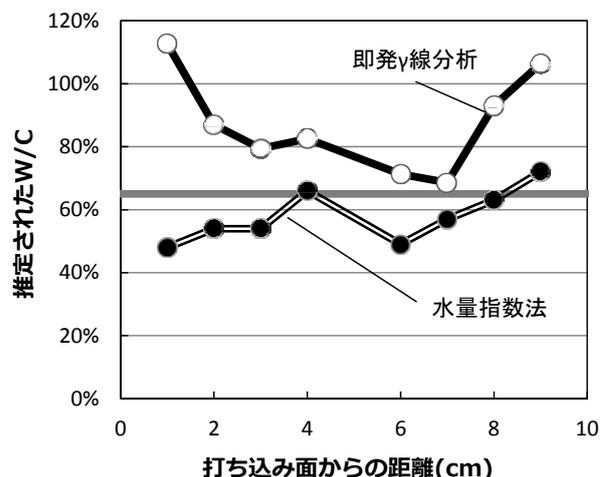


図-13 水量指数法による推定結果との比較 (W/C=65%)

5.4 水量指数法による水セメント比の推定結果との比較

即発γ線分析によって推定された水セメント比の妥当性を検証するために、水量指数法による水セメント比の推定を行い、相互の比較を行った。

水量指数法とは、鉄道総合技術研究所が開発した水セメント比の推定手法であり³⁾、セメント水和時に生じる水酸化カルシウムの結晶の大きさが配合時の水セメント比と相関があることを利用した方法である。本研究では文献の示すとおり、供試体全量を粗骨材が出来る限り混入しないように粉碎し、粉末X線回折により水量指数を求める。次に、測定試料を塩酸により溶解させて骨材量を、示差熱天秤における400℃付近の減量から水酸化カルシウム量を求め、あらかじめ設定された検量線から水セメント比を推定した。

図-12、図-13に即発γ線による分析結果と水量指数法による分析結果を示す。水セメント比が40%の場合においては、特に表層からの距離が近い部分では即発γ線分析は水量指数法とおおよそ同程度の精度で推定されており、また水セメント比の設定値40%に極めて近い値を呈している。一方で、水セメント比が65%の場合においては、水量指数法は設定値に対して水セメント比を過小評価し、即発γ線は過大評価となり、水量指数法と即発γ線分析の相違は少なくとも20%以上となっている。打設されたコンクリートの真の水セメント比分布は不明であるため、この結果から即座に、一方もしくは両者の測定精度に難があると指摘することは出来ないが、少なくとも、図-13の表層部分を除き、両測定手法の表層から深さ方向への水セメント比の増減傾向が定性的にはおおよそ同じであることから、即発γ線分析による配合推定手法において一定の妥当性はあるものの、定量分析においては精度向上のための課題が残されている。特に高水セメント比における精度向上には前述のように、高水セメント比の供試体による検量線を用いた評価が必要である。

6. 結論

- (1) γ線分析手法による、コンクリートの局所的な水セメント比の推定は可能である。
- (2) 低水セメント比では、示方配合および水量指数法による結果に近い推定を得ることができた。
- (3) 高水セメント比においては、示方配合を過大評価する傾向にあった。

謝辞

本研究は、JST地域イノベーション創出総合支援事業シーズ発掘試験、および科学研究費補助金(基盤研究(B)、課題番号:21360207)の助成を受けて実施した。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) コンクリート専門委員会：硬化コンクリートの配合推定について、セメント・コンクリート, No.25117, No.5, pp.3-12
- 2) ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS : Standard Test Method for CEMENT CONCRETE OF HARDENED PORTLAND CEMENT CONCRETE, pp.43-46, 1986
- 3) 上原元樹, 佐々木孝彦, 立松英信, 水酸化カルシウムの形態的特徴による硬化コンクリートの水セメント比(W/C)評価, 土木学会第58回年次学術講演会講演集, pp851-852, 2003
- 4) 山田耕大, 氏家勲, 坂根仁, 松江秀明：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γ線分析の適用性について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.2, pp.757-762, 2008.
- 5) 山田耕大, 氏家勲, 坂根仁, 松江秀明：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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, No.1, pp.1981-1986, 2009