

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560564

研究課題名(和文) コンクリートの材料劣化および修復過程の組織解明に基づく画像診断法の提案

研究課題名(英文) Image diagnosis based on characteristics of microstructure in deterioration and restoration processes of concrete

研究代表者

五十嵐 心一 (Igarashi, Shin-ichi)

金沢大学・環境デザイン学系・教授

研究者番号：50168100

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：材料劣化もしくは補修が進行しているコンクリートの組織変化を、画像解析により定量的に評価した。その結果、材料劣化に関わる組織の特徴的な変化や修復現象が確認できる寸法レベルが明らかとなった。この際、画像診断として物性との関連づけを行うためには、電気特性の計測と組み合わせることが簡便かつ効果的である。また、超吸水性ポリマー粒子や気泡など、ある程度寸法の大きな粒子分散系を調査対象とするときには、低倍率で視野を広くとることが簡易な画像診断となるためには必要である。また、そのような様々な観察レベルの組織変化に対して点過程の考え方を適用することは、組織の差異の直観的理解および定量的評価に非常に有用である。

研究成果の概要(英文)：Deterioration and restoration processes of concrete were examined by image analysis. Coarse capillary pore structures were not greatly changed by carbonation. Surface treatments with silicate-based penetrants also did not change the visible pore structures. Nevertheless, electrical conductivity of concrete was significantly changed by carbonation and the surface treatment. The relevant changes in microstructure occur at observation levels smaller than the resolution of images. Coupling the SEM examination with electrical conductivity testing is useful for the image diagnosis of concrete. Images acquired at low magnifications were also used for the diagnosis. Superabsorbent polymer particles (SAP) and air bubbles were well distinguished from the cement paste matrix in mortar images, which were taken by a flatbed scanner. Regardless of magnifications and means for obtaining segmented images, the point process statistics is quite useful for quantitative evaluation of those particles.

研究分野：土木材料

キーワード：画像解析 空間統計量 点過程 電気伝導率 中性化 けい酸塩系表面含浸材 超吸水性ポリマー

1. 研究開始当初の背景

コンクリートの様々な画像情報をもとに物性を推定、診断しようとする試みは古くから行われてきた。多くの手法が提案されてきたなか、1980年代半ばにコンクリートへの適用が提案された方法が、反射電子像の画像解析法である。以後、国内外の多くの研究者がその有用性を確認すべく多くの研究取り組みがなされ、四半世紀を経た今では、セメントの水和反応過程、ポゾラン反応による組織変化の定量評価、および実コンクリート中の微視的構造の局所的変動(例えば、遷移帯の存在)の解明など、微視的構造の解明に有用な一般的手段として認識されるにいたっている。

研究代表者はこの手法を早い段階から積極的に導入し、セメント硬化体の強度発現特性や耐久性に重大な影響を及ぼす物質透過性が、反射電子像に見られる幾何学的特徴と密接に関連づけられることを明らかにしてきた。特に、近年では、従来の反射電子像の画像解析法の評価指標である面積率(体積率)だけでなく、空間統計学に基づく2次のステレオロジー量と称される距離を変数とする確率関数を評価指標とすることを提案してきた。この評価法を用いることにより、より詳細な幾何学的特徴が抽出され、それらがセメント硬化体の巨視的物性と相関するだけでなく、物性発現機構に関わる情報も与えることを示してきた。

しかし、研究代表者に限らず、既往の反射電子像の画像解析法の研究事例は、おもに水和反応過程、すなわち材料組織が形成されていく過程に着目し、配合や材齢、養生条件が組織形成に及ぼす影響を明らかにすることを検討対象としてきた。維持管理や持続可能性が強く叫ばれる今日、耐久性評価や長寿命化方策の確立はより喫緊の課題でありながら、材料が劣化していく過程もしくは補修後の組織変化過程に対して、反射電子像の画像解析法を適用してきた例は国内外でも見当たらない。組織観察および評価法として信頼性のある方法でありながら、これが劣化過程に用いられてこなかったのは、実務上、コンクリート構造物の劣化は外観の異常(目視点検)にて認知、判断せざるを得ず、そこに至るまでの潜伏期の微細な組織変化に注目し続けることは現実的ではないためである。しかし、コンクリートの劣化機構の中には、ひび割れの発生前に組織変化をとまなうものも多い。したがって、劣化過程の様子を明らかにすることは、実務レベルにて判断された「劣化」の裏付けになるだけでなく、材料自身の性能低下レベルの判断や寿命予測に対して重要な基礎データを与えるものと考えられる。事実、これまでの予備的な検討により、固体相の空間分布や空隙分布と物性の相関性から、劣化に関わる組織変化の定量的な情報を抽出できることを見出しており、さらには、組織変化を点過程として評価、シミュ

レーションすることに新たな研究展開の可能性があることを確信していた。

2. 研究の目的

現在のコンクリート工学、技術における喫緊の課題は「維持管理」と「長寿命化」というキーワードで括られるとって過言ではない。この維持管理における重要行為に位置付けられたのが「診断」である。診断には多くのレベルが存在すると考えられるが、電子顕微鏡観察は、詳細調査において最終判断を下すための重要診断手段である。これによって、劣化原因の推定もしくは特定がなされるが、劣化進行予測に微視的な構造の特徴的な変化の画像情報(潜伏期の情報)を用いることの可能性については、いまだ明らかではない。

研究代表者はこれまで、反射電子像の画像解析法の適用により、材料組織形成過程-強度発現特性-物質移動特性が対応づけられることを明らかにしてきた。本研究では、これらの知見をコンクリートの材料劣化過程と修復過程の評価に応用し、材料設計値や維持管理特性値に関係づけることを目的としている。すなわち、画像上の定量的な組織変化を劣化や修復の兆候としてとらえることの可能性と、劣化進行予測の有用な情報となりうる画像パラメーターについて検討する。さらに、実構造物から採取したコンクリートコアに適用されるべき画像解析手法を体系化して、研究開発および実務を問わず、コンクリートの画像診断の基礎スキームの確立を目指す。

3. 研究の方法

研究計画全体を以下の3テーマに分けて実験を遂行した。

(1)テーマ1:材料劣化過程の解明:反射電子像の画像解析を主たる手段として用いること、および反射電子像において中間色で抽出が困難であった水酸化カルシウム相の抽出手順が確立できていたことから、水酸化カルシウムの消長が劣化機構を反映する中性化を検討対象とした。中性化の進行にともなう空隙構造の変化を、画像解析と空間統計量により詳細に検討し、物質透過性の変化と組織変化の対応を明らかにした。

(2)テーマ2:材料修復過程の解明:修復過程としては、テーマ1との関連も考慮し、中性化による自己治癒と補修工法の一つであるけい酸塩系表面含浸工法による組織変化を検討の対象とした。中性化は鉄筋腐食に関わる劣化要因である一方にて、炭酸カルシウムの析出により組織を緻密化し、これが物質透過性を低減させる自己治癒効果をもたらす。また、けい酸塩系表面含浸材は、コンクリートの表層に浸透して材料自身が固化もしくはコンクリート中の水酸化カルシウムとの反応により、同じく表層の物質透過性を低減する効果を持つ。しかし、これがどのような空隙の大きさレベルで生じるのか、もしくはこれを微視的組織変化の観察にて効果

を確認するにはどのレベルの画像を必要とするのが明確ではない。この点を明らかにすることを目的として、所定の手順に従って含浸処理されたセメントペースト表層部の組織観察を行い、その変化と表層部の力学的特性および物質透過性との対応を明らかにした。

(3)テーマ3：低倍率画像の有効性：実際の劣化コンクリートにて、粗大な欠陥を含む場合に対処しうる画像診断の手順の確立を目的としていた。これまでの研究実績から、画像を取得することは容易であって、それよりも、適切な倍率と観察・測定領域の大きさ、観察対象とする粒子（分散相）の体積代表要素の決定が問題であることがわかってきた。さらに、現在、自己治癒材としての利用や、レオロジー調整剤としての新たな利用法が検討されている超吸水性ポリマーに関して、国際共同研究を遂行していくうえで、粗大な粒子の分布状況を把握する必要性を生じた。よって、実際の劣化コンクリート中の粗大な欠陥も含めて、粗大粒子分散系でも対応しうる画像診断手順の開発の端緒として、分散粒子の体積代表要素を完全に包含すると思われる領域の画像取得とその解析手法の確立が先務であると判断した。そこで、簡便ながらもサブミクロンレベルの解析も可能であるフラットベッドスキャナーを用いて取得した等倍画像について、画像内の幾何学的特徴量の定量評価とマクロな物性との対応について明らかにし、低倍率画像の有効性について検討した。また、これにともない、材料劣化過程の一つである凍害に関連するトピックを加えることとし、気泡の空間分布構造の簡便かつ現実的な評価法、診断法の開発に

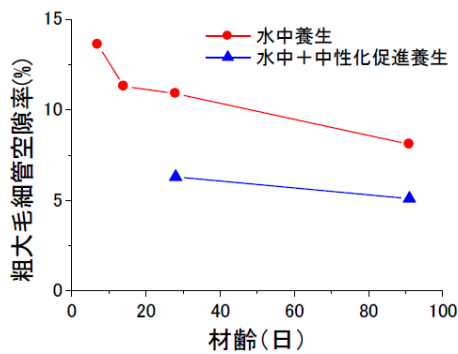


図-1 粗大毛細管空隙率の経時変化

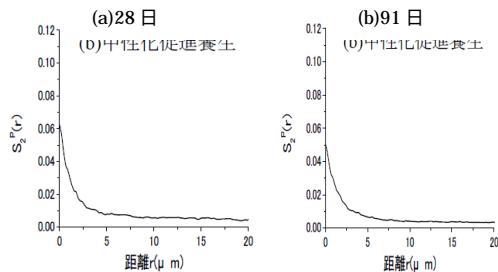


図-2 促進中性化養生中の粗大毛細管空隙の2点相関数の変化

着手した。

4. 研究成果

(1)中性化による組織変化と物質透過性の対応

図-1 は水セメント比 0.50 の普通セメントペーストを材齢 27 日まで水中養生を行ったのちに促進中性化（20℃，60%R.H.，CO₂濃度 5%）させたときの粗大毛細管空隙率を、水中養生を継続した場合と比較して示したものである。中性化により粗大毛細管空隙率は減少するが、促進中性化進行中の粗大毛細管空隙の空間分布構造の変化は大きくはなく、粗大な空隙の残存傾向が現れる程度である（図-2）。その一方にて、促進中性化養生を1日受けただけの材齢 28 日では、電気伝導率は水中養生を継続した場合よりも大きくなっているが、その後毛細管空隙率に大きな変化はないにもかかわらず、材齢 91 日においては、水中養生を継続したものと同程度にまで低下する（図-3）。これらの結果は、粗大毛細管空隙の範囲でも径の小さい空隙および画像分解能以下の微細な空隙にて、中性化にともなう炭酸カルシウムの析出を生じ、これが物質透過性の低下をもたらすことを示している。

(2)けい酸塩系表面含浸材による組織変化と材料設計物性値との対応

図-4 は水中養生7日後に7日間の湿潤養生を行った後に反応型けい酸塩系表面含浸材を塗布した普通セメントペーストの電気伝導率の変化を示したものである。含浸処理に

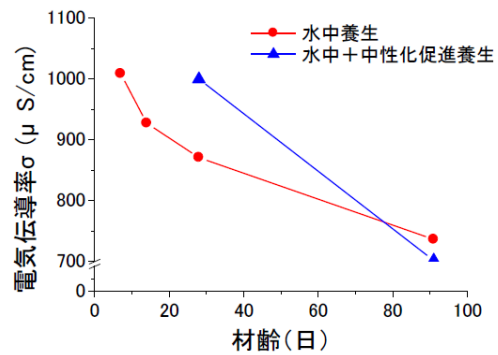


図-3 電気伝導率の変化

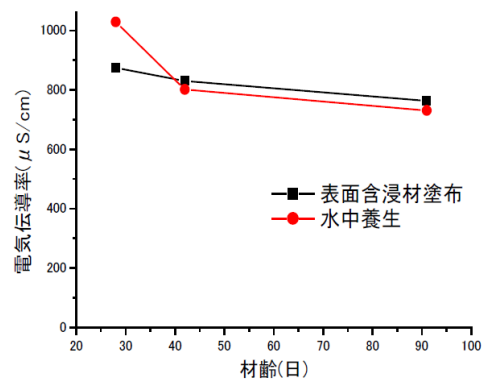


図-4 電気伝導率試験結果

より電位伝導率は低下し、その後も水中養生を続けた場合と同程度にまで低下する。しかし、その一方にて、含浸処理された表層部の水和度は高くはなく、粗大毛細管空隙構造では水中養生を続けた場合よりも明らかに空隙率が大きく、また粗大な空隙も多い(図-5)。これらの結果より、コンクリートの補修や予防保全に用いられる反応型けい酸塩系表面含浸材による組織の緻密化とそれともなう物質透過性の低減は、微細な空隙の充填によりもたらされると考えられる。このとき実際に処理された表層の硬度は高くなっており、緻密化を力学特性の変化としても捉えることも可能であった。そこで、セメントペーストの微小硬度が圧縮強度と良い相関性を有することに着目して、Powersモデルのゲルスペース比と微小硬度の対応関係から、微細な空隙の充填の程度を評価する方法を提案した。その結果、画像分解能以下の微細な空隙の約50%がけい酸塩系表面含浸材の反応により充填されることが示され(図-6)、画像解析結果は、含浸材の新たな反応系が加わった場合でも、水和反応モデルと矛盾しないという重要な知見を得た。

また、そのようなけい酸塩系表面含浸材による表層の緻密化を材料設計に反映させることを意図して、電気伝導率の測定結果から等価かぶりを推定したところ、その値は既往の研究結果ともほぼ一致した(表-1)。またその等価かぶりの算定値から求めた中性化速度係数も既往の研究と一致していた(表-1)。

以上の(1)と(2)の結果より、画像情報と電気伝導特性(物質透過性)を組み合わせることで、材料劣化や修復による組織変化がどの観察レベルで生じているのかが明確になり、また、材料物性や劣化の簡便な

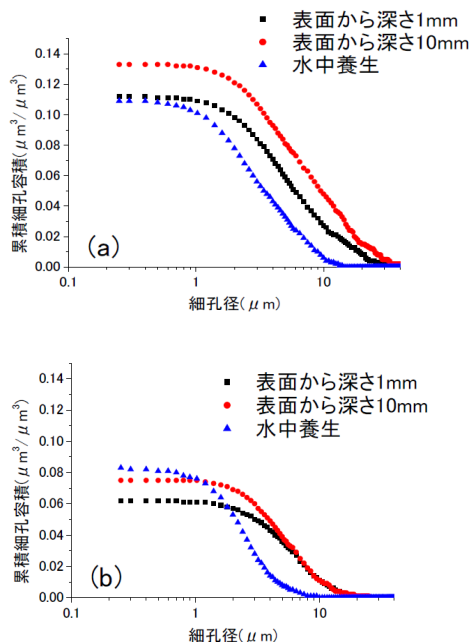


図-5 粗大毛細管空隙径分布
(a)28日 (b)91日

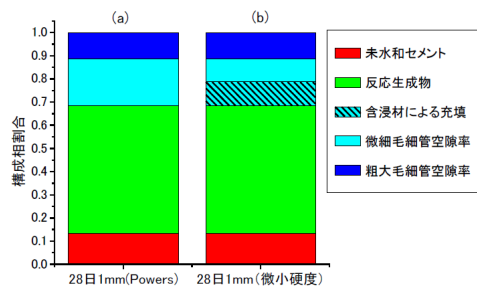


図-6 セメントペーストの含浸改質部における硬化体構成割合

表-1 改質層の特性値

材齢(日)	改質深さ(mm)	等価かぶり(mm)	推定中性化速度係数比
42	3	5.1	1.7
56	5	8.4	1.7
91	5	10	2.0

診断において、両者の結果を組み合わせることで評価することが非常に有用であるといえる。

(3) 低倍率画像からの情報抽出と有効性

図-7 にスキャナーを用いて取得した画像中の超吸水性ポリマー粒子(SAP)の空間分布(K関数)を示す。自己養生の観点から同じ内部貯水量になるように材料設計を行った場合でも、粒子寸法に応じて空間分布が異なることが明確かつ定量的に示されている。セメントペースト中では、SAPはほぼランダムに分布するが、骨材が存在すると予想通り凝集側の分布を示す。しかし、その凝集の程度は、骨材によってランダム分布が制限されることによって生ずると予想される凝集性よりも大きく、特に、小さなSAP粒子は短距離の範囲に凝集して存在する傾向があることを示している。

自己治癒効果を得ることを意図して利用されるSAPの内部養生効果は、SAPの粒子寸法によって左右されることが知られており、図-7に示したSAP粒子に関しては、大径粒子の方が自己収縮低減効果は大きい。よって、このようなSAP粒子の凝集性と近年その影響について国内外にて報告されるようにな

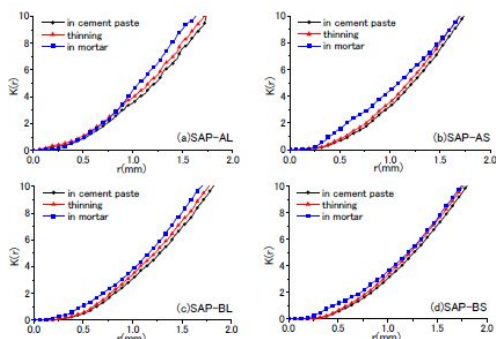


図-7 SAP粒子のK関数

った内部貯水の早期放出という現象を考え合わせるならば、効果的な内部養生を行わせるためには、アルカリ性環境下での貯水時間を制御できるような品質と最適粒子寸法を見出し、これをランダムに分散させる必要があると考えられる。

図-7 にて示された情報は、等倍率の画像から簡便に計算されたものである。つまり、画像情報をもとにコンクリートの性能を考える場合は、対象事象に応じた観察倍率の選択が重要であり、かつ一般に目視点検などで観察される劣化現象についても、適切な評価パラメータを設定することで、低倍率像も十分に利用できる可能性があることを示している。

これら一連の低倍率画像の有効性が明らかになっていくことにヒントを得て、反射電子像の画像解析法にて一般的に採用される倍率の画像の特徴と、より微細なレベルにおける組織の特徴との間にも相関性が存在するのではとの着想にいたった。図-8 はその着想に基づく研究の一つとして行ったものであり、水銀圧入法と画像解析法の空隙構造の相関性を示したものである。パーコレーションの考え方に基いて解釈すると、粗大毛細管空隙だけパーコレーションネットワークを形成できる場合、すなわち粗大毛細管空隙率がある限界の値を超えると、水銀圧入法により推察される微細な空隙の連続性と粗大毛細管空隙率の間には正の相関性が現れる

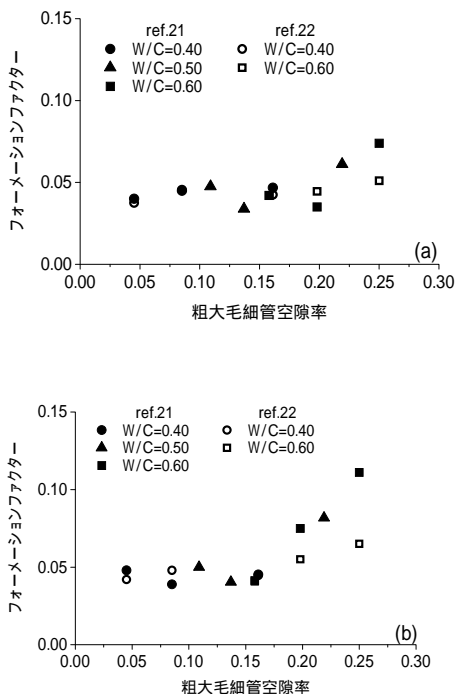


図-8 水銀圧入法のフォーメーションファクターと画像解析法の粗大毛細管空隙率の相関性：(a)パーコレーション開始径を水銀圧入の限界空隙径に採った場合 (b)パーコレーション開始径を水銀圧入のしきい空隙径に採った場合

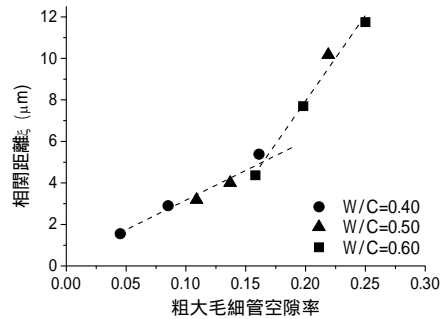


図-9 相関距離と粗大毛細管空隙率の関係

ことを示している。また、そのような限界の空隙率を超えると、図-9 に示す様に、粗大毛細管空隙空間構造にも連続性の変化が現れる。つまり、空隙構造には相関性が存在するようであり、この結果は今後の研究展開において非常に示唆的である。すなわち、低倍率画像を用いて劣化や修復にともなう物性変化の画像診断を行おうとする際、低倍率画像にて観察された組織変化の特徴量が、劣化や修復のメカニズムと直接結びつけられるような微細なレベルの組織変化と相関する可能性を示唆する。この点についてはさらに詳細な研究を継続する予定であり、研究計画を立案中である。簡便な画像診断法確立において、判断の拠り所を与えることにもなりうる重要な知見であると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 25 件)

- [1] 小出至也, 室谷卓実, 五十嵐心一: 電気伝導率の測定に基づくけい酸塩系表面含浸材による改質部の物性評価, セメント・コンクリート論文集(査読有), Vol.68, 2015, pp.178-185.
- [2] Kusayama, S., Kuwabara, H. and Igarashi, S.: Comparison of salt scaling resistance of concretes with different types of superabsorbent polymers, Proc. of International RILEM Conference on on Application of Superabsorbent Polymers and New Admixtures in Concrete Construction (査読有), PRO95, 2014, pp.267-277.
- [3] Yokota, K., Igarashi, S.: Evaluation of clustered distribution of superabsorbent polymers and its relation to autogenous shrinkage behaviour of internally cured mortars, Proc. of the 13rd International Conference on Durability of Building Materials and Components(査読有), 2014, pp.963-970.
- [4] 室谷卓実, 小出至也, 五十嵐心一: 異なるけい酸塩系表面含浸材の微細ひび割れに対する補修効果の比較, コンクリート工学年次論文集(査読有), Vol.36, No.1, 2014, pp.814-819.

- [5] 小出至也, 室谷卓実, 五十嵐心一: 電気泳動法によるけい酸塩系表面含浸材の改質部の物性と改質深さの推定, コンクリート工学年次論文集(査読有), Vol.36, No.1, 2014, pp.616-621.
- [6] 横田光一郎, 五十嵐心一: 骨材粒子が超吸水性ポリマーの空間分布に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集(査読有), No.67, 2014, pp.187-194.
- [7] Igarashi, S.: Relationship between electrical conductivity and spatial structure of capillary pores in cement pastes, Proc. of the 7th RILEM International Conference on Self-Compacting Concrete and of the 1st RILEM International Conference on Rheology and Processing of Construction materials (査読有), PRO90, 2013, pp.333-340.
- [8] 五十嵐心一, 西川友梨: 水銀圧入法と画像解析法により求めたセメントペーストの毛細管空隙構造の相関性, コンクリート工学年次論文集(査読有), Vol. 24, No. 3, 2013, pp.183-191.
- [9] Watanabe, S. and Igarashi, S.: Changes in Pore Structure by a Silicate-based Surface Penetrant and Their Effects on Mechanical and Transport Properties in Cement Pastes, Proc. of the 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies - SCMT3, (査読有), Paper T4-35(CD ROM), 2013.
- [10] 横田光一郎, 五十嵐心一: RGB 情報を利用したモルタル断面画像からの骨材抽出と構成相の空間分布特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集(査読有), Vol.35, No.1, 2013, pp.1759-1764.
- [11] 渡辺晋吾, 五十嵐心一: けい酸塩系表面含浸材によるセメントペーストの微視的構造の変化, コンクリート工学年次論文集(査読有), Vol.34, No.1, 2012, pp.1606-1611.
- [12] 石田聡史, 五十嵐心一: 中性化の進行がセメントペーストの毛細管空隙構造に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集(査読有), Vol.34, No.1, 2012, pp.622-627.
- [学会発表](計 37 件)
- [1] 室谷卓実, 五十嵐心一: セメントペースト中の気泡の空間分布の定量評価, 平成 26 年度土木学会中部支部研究発表会, 2015 年 03 月 06 日 ~ 2015 年 03 月 06 日, 豊橋技術科学大学
- [2] 室谷卓実, 五十嵐心一: コンクリートのひび割れ部に対するけい酸塩系表面含浸材の改質効果の比較, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014 年 09 月 10 日 ~ 2014 年 09 月 12 日, 大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市)
- [3] 横田光一郎, 五十嵐心一: 低倍率画像を利用したコンクリート断面のステレオロジ-量の評価, 第 68 回セメント技術大会, 2014 年 05 月 13 日 ~ 2014 年 05 月 15 日, ホテルメトロポリタン(東京)
- [4] 小出至也, 五十嵐心一: けい酸塩系表面含浸材改質層の電気伝導率の評価に基づく中性化進行パラメーターの推定, 第 68 回セメント技術大会, 2014 年 05 月 13 日 ~ 2014 年 05 月 15 日, ホテルメトロポリタン(東京)
- [5] 横田光一郎, 五十嵐心一: 低倍率のコンクリート画像のステレオロジ-量の比較, 平成 25 年度土木学会中部支部研究発表会, 平成 26 年 3 月 7 日, 岐阜大学(岐阜県岐阜市)
- [6] 小出至也, 五十嵐心一: 電気泳動法によるけい酸塩系表面含浸材の改質深さの推定, 平成 25 年度土木学会中部支部研究発表会, 平成 26 年 3 月 7 日, 岐阜大学(岐阜県岐阜市)
- [7] 西川友梨, 五十嵐心一: 水銀圧入法と画像解析法により求めた毛細管空隙構造の特性値の関係, 土木学会第 68 回年次学術講演会, 平成 25 年 9 月 4 日 ~ 9 月 6 日, 日本大学生産工学部(習志野市)
- [8] 横田光一郎, 五十嵐心一: モルタル中の骨材が SAP 粒子の空間分布に及ぼす影響, 第 67 回セメント技術大会, 平成 25 年 5 月 13 日 ~ 5 月 15 日, ホテルメトロポリタン(東京都豊島区)
- [9] 西川友梨, 五十嵐心一: 水銀圧入法と画像解析法により求めた毛細管空隙構造の特性値の相関性, 平成 24 年度土木学会中部支部研究発表会, 平成 25 年 3 月 8 日, 愛知工業大学(愛知県豊田市)
- [10] 石田聡史, 五十嵐心一: 自己治癒を目的とした中性化促進養生による修復可能性, 平成 24 年度土木学会中部支部研究発表会, 平成 25 年 3 月 8 日, 愛知工業大学(愛知県豊田市)
- [11] 渡辺晋吾, 五十嵐心一: けい酸塩系表面含浸材によるセメントペースト表層硬度の増大メカニズム, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 平成 24 年 9 月 5 日 ~ 9 月 7 日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)
- [12] 石田聡史, 五十嵐心一: 中性化が粗大毛細管空隙構造と電気伝導率の対応に及ぼす影響, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 平成 24 年 9 月 5 日 ~ 9 月 7 日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)
- [13] 渡辺晋吾, 五十嵐心一: けい酸塩系表面含浸材の改質効果の評価方法に関する一考察, 第 66 回セメント技術大会, 平成 24 年 5 月 29 日 ~ 5 月 31 日, ホテルメトロポリタン(東京都豊島区)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

五十嵐 心一 (IGARASHI, Shin-ichi)
 金沢大学・環境デザイン学系・教授
 研究者番号: 50168100