

平成22年5月13日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360193
 研究課題名（和文）寒冷地沿岸コンクリート構造物の環境影響評価と耐久性評価のための統合化モデルの開発
 研究課題名（英文）Integrated model to evaluate environmental aspects and durability for concrete structures in marine cold regions
 研究代表者
 杉山 隆文（SUGIYAMA TAKAFUMI）
 北海道大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：70261865

研究成果の概要（和文）：寒冷地沿岸に建設されるコンクリート構造物が環境にやさしく長持ちするように設計されるための手法を研究した。火力発電所から排出される石炭灰による環境負荷とその有効利用の観点から、石炭灰を用いることでセメントや砂の使用量を小さくできるコンクリートを研究した。石炭灰が実際に使用された護岸構造物や室内実験から、石炭灰を用いたコンクリートについて、海水作用に対する耐久性や寒冷地で問題となる凍害の抵抗性が優れることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Methodology to construct environment-friendly and durable concrete structures in marine cold regions was studied. Coal ash that is a by-product in thermal power plants was used for cement and sand replacement in mixing concrete. In this way concrete with coal ash showed higher durability against salt attack and freezing and thawing cycles. Integrated design to achieve both aspects was proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|------------|
| 2007年度 | 5,800,000 | 1,740,000 | 7,540,000 |
| 2008年度 | 2,200,000 | 660,000 | 2,860,000 |
| 2009年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 総計 | 9,700,000 | 2,910,000 | 12,610,000 |

研究分野：コンクリート工学

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：寒冷地沿岸，環境影響，耐久性，フライアッシュ，AEコンクリート，塩害，凍害，X線CT，EPMA

1. 研究開始当初の背景

寒冷地沿岸のコンクリート構造物は厳しい気象と環境に曝されることから特に高い耐久性が要求される。一方で、コンクリート材料の使用に伴う環境負荷を低減することも要求される。一見相反する要求を実現するための設計手法の構築が課題であった。これまで塩害や凍害の研究は多くなされており、

環境負荷を低減するための方策も研究されていた。しかし、寒冷地沿岸コンクリート構造物に対する劣化作用を特定し、環境側面も同時に考慮するための設計手法の具体はほとんど見あたらない。

2. 研究の目的

寒冷地沿岸コンクリート構造物のライフサ

イクルを通じた環境負荷評価技術と劣化予測技術を融合することで、環境性と耐久性を重視した健全度評価技術が開発できると考えた。これを具体化するため、先ず、石炭灰などのリサイクル資源を用いて、寒冷地沿岸域における気象条件を踏まえながら、コンクリート構造物の劣化現象を実験的に明らかにする。また、塩化物イオンとカルシウムイオンの同時輸送問題に対応する数理モデルの深度化、高度化、気象条件を劣化外力とした定量化技術を通じた入力値の研究を行う。コンクリート構造物の環境負荷評価の定量化にあたっては、寒冷地沿岸域の特殊性を配慮しながら、既存の統合化手法の適用性の再検証と新しい評価手法の開発についてそれぞれ研究する。

3. 研究の方法

本研究課題は次のような方法で実施した。

(1) 耐久性の新しい評価手法の開発

塩化物イオン浸透性をEPMAから定量化する手法を採用した。また、従来法としての全塩化物イオンの濃度測定を行い、EPMA法の妥当性を検証した。塩害に関する劣化予測を行うために、腐食発生限界塩化物イオン濃度を的確に定量化する必要があった。そのために鉄筋腐食時点を詳細に測定できる自然電位モニタリング手法を研究開発した。合わせて従来法としての交流インピーダンス法を用いたモニタリングも実施した。

耐凍害性を評価するためにAEコンクリートの空隙分布を三次元で定量化する新しい手法として、X線CT法を利用した。適切な利用にあたりエントレインドエアの抽出のための画像処理技術の開発と数値演算処理方法の研究開発を実施した。

(2) フライアッシュコンクリートの耐久性評価

ライフサイクルを通じた環境負荷においては、材料製造段階が比較的大きいことから、普通ポルトランドセメントおよび細骨材の代替として、フライアッシュを用いることで環境影響を考慮した。フライアッシュ（石炭灰）は、火力発電所の稼働により排出される産業廃棄物であり、処分場の逼迫など環境側面から有効利用が要請されている。本研究では、寒冷地沿岸コンクリートの要求性能である塩害と凍害の抵抗性を耐久性評価指標とし、これらフライアッシュコンクリートの耐久性を定量的に評価した。使用したフライアッシュはJIS A6201に規定するⅡ種およびⅢ種である。

塩害では鉄筋腐食発生までの潜伏期で重要となる塩化物イオン浸透性および鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度を普通コンクリートと比較しながら明らかにした。また、

凍害や塩害に係る耐久性評価では、コンクリートの微細構造が大きな支配要因であることから、X線CT法を用いた微細構造評価も合わせて実施した。

(3) 環境評価と耐久性評価の統合

寒冷地沿岸コンクリート構造物に特有な劣化現象に関して、環境負荷低減の方策も踏まえて、耐久性を評価する手法を研究した。環境影響と耐久性に関するそれぞれの異なる指標を独立して指標化することで統合化モデルを構築することを目指して、具体的な事例をフライアッシュコンクリートで示した。耐久性評価は、劣化シミュレーションツールから得られる耐用年数であり、環境影響は、廃棄物発生量やCO₂発生量を指標と考えた。

4. 研究成果

(1) EPMAによるフライアッシュコンクリートの塩化物イオン浸透性評価

図-1 および図-2 から、実構造物では、フライアッシュの導入効果が明確に現れている。すなわち、フライアッシュを80kg/m³用いたコンクリート(F2-80P)において、塩化物イオンの浸透は著しく抑制されており、6年9ヶ月の間塩害環境下にあつたにも関わらずその浸透深さは30mm以下であった。表層付近に存在している塩化物イオンが内部へと拡散していかないことから塩分浸透抵抗性の向上が確認できる。また、フライアッシュを60kg/m³用いたコンクリート(F1-60P)においても普通コンクリート(B0-0P)と比較して、塩化物イオンの浸透抵抗性は向上していた。水セメント比は普通コンクリートの56%に対して70%と大きい。しかし、塩化物イオン浸透抵抗性は増大しており、フライアッシュをセメントの一部に置換した場合においても塩分浸透抵抗性が向上することが確認された。また、B0-0P、F1-60Pにおいて表層付近の塩化物イオン濃度がF2-80Pに比べて相対的に低くなるのは、塩分浸透抵抗性が小さく、表層の塩化物イオンが内部まで拡散しているためと考えられる。その傾向はB0-0Pの方がF1-60Pに比べて顕著である。

電位差滴定試験から得られる全塩化物イオン濃度と特性X線強度の関係から検量線を算出した。電位差滴定試験の結果は、浸透方向に対して各層のスライス片における平均的な濃度である。そこで、特性X線強度も該当する各スライス片の幅の平均値として求めた。このようにして求めた、全塩化物イオン濃度と特性X線強度との相関として図-3に示すような検量線を提案した。

塩化物イオンは、セメントペースト部に存在し骨材には存在しない。したがって、各層における骨材の分布割合が、検量線の精度に

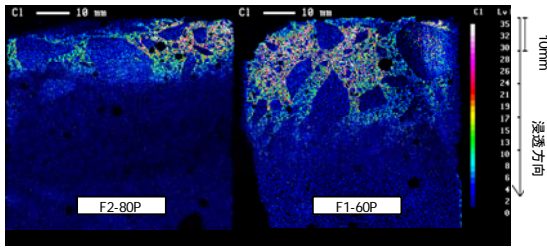


図-1 EPMAによる塩化物イオン浸透評価

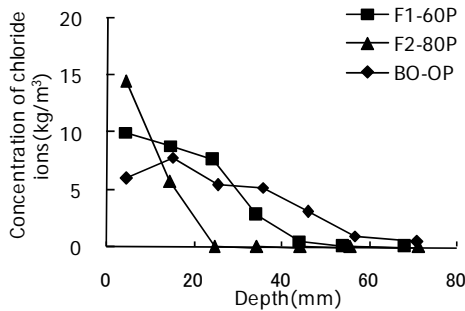


図-2 全塩化物イオン濃度分布

影響を及ぼすと思われた。

補正した特性 X 線強度分布曲線が、浸透深さ方向に得られるので、この曲線に対して、Fick の第 2 法則の解を用いて回帰分析から見かけの拡散係数 (Dap-EPMA) を計算した。塩化物イオンの浸透予測には、表面塩化物イオン濃度 (c0) が必要である。X 線強度分布曲線から求められる回帰曲線から x=0 における特性 X 線強度 (x0) を求め、この値を、図-3 の検量線に代入 (c0=1.263x0+1.600) して、表面塩化物イオン濃度を計算した。

以上のように、予測結果と実測値の比較が可能になり、浸透深さは実測値と良く一致していた。なお、F1-60P の表面の誤差が大きくなったが、電位差滴定法においては各層の全幅が分析対象であるのに対して、EPMA 法においては分析対象の範囲を限定したことによる誤差と考えられた。

(2) フライアッシュコンクリートの鉄筋腐食限界塩化物イオン濃度

本研究では、最近提案された新しい実験方法をフライアッシュコンクリートへ適用した。すなわち、供試体内に埋込んだ鉛照合電極を用いて、自然電位の連続計測により腐食発生時点を明確に捉えて、その時点での塩化物イオン濃度を求めることで、腐食発生限界濃度をより適確に求めた。また、腐食診断器により鉄筋の腐食速度も計測することとした。

供試体寸法は 100×100×400mm で、粗骨材最大寸法は 13mm、鉄筋はみがき丸鋼 (D19) を

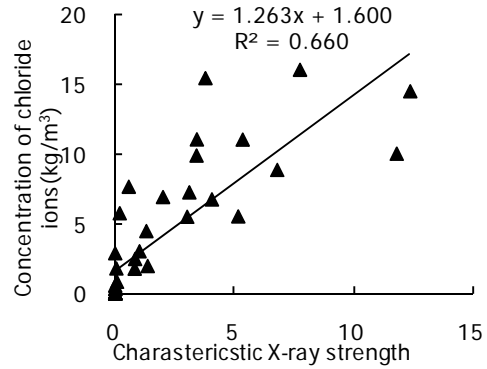


図-3 フライアッシュコンクリートの検量線

用いて、かぶりが 20mm と 25mm の位置に計 2 本配置した (図-4)。供試体の打設方向は、コンクリートと鉄筋の境界面でのブリーディングの影響を避けるために縦打ちとした。供試体は自然電位を計測するための鉛照合電極を埋め込んだものを 5 体 (N50PS1~N50PS5) 制作した。水の出入りを防ぐために側面 4 面を気密アルミテープで覆った。塩分の浸透方法は、供試体表面中央に設置した幅 50mm の供給セルから 10%NaCl 溶液を浸透させた。

自然電位の計測には、供試体内部に埋設した鉛照合電極により自然電位を 8 時間間隔で連続モニタリングする方法とした。また、定期的に供試体上面に 2 重対極センサを設置して、分極抵抗法により腐食速度を計測した。

供試体の解体時期は、自然電位が定常状態より大きく低下した時点とした。腐食状況の確認は供試体を割裂して鉄筋を取り出し目視で行った。

塩化物イオン濃度の測定位置は塩水を接触させた範囲の直下とした。その位置から厚さ約 5mm のスライス片を深さ方向に 8 点もしくは 9 点採取した。塩化物イオン濃度の測定方法は、塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法により全塩化物イオン濃度を測定した。

普通ポルトランドセメントを使用した W/C が 50% (圧縮強度 42.9N/mm²) の普通コンクリートに関して、図-5 にかぶり 20mm の自然電位の計測結果を示す。供試体は、全て同一

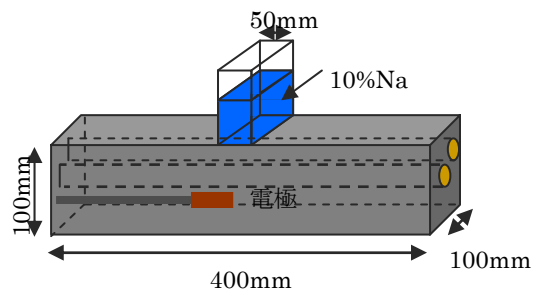


図-4 鉄筋腐食実験の概要

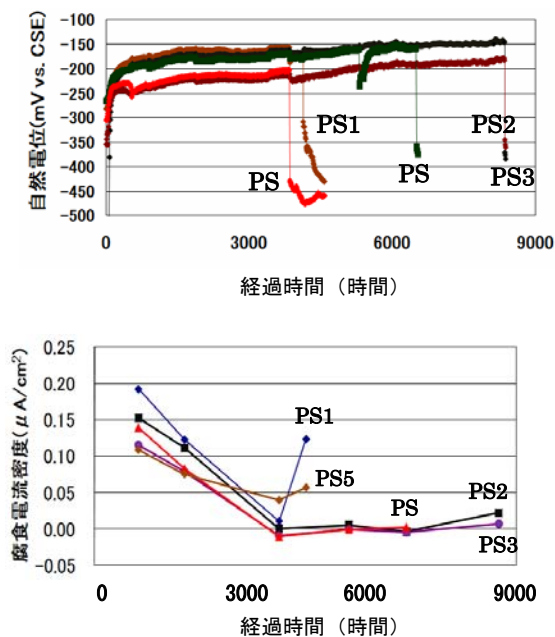


図-5 自然電位および鉄筋腐食電流密度の経時変化

配合の供試体 (PS1~PS5) である。PS3 を除く全ての供試体について、かぶり 20mm の鉄筋の自然電位が最初に大きく低下した。PS3 では、同時期に 25mm の鉄筋の自然電位も低下した。PS1, PS5 では鉄筋と接するコンクリート上部に空隙が存在していたため、他の三体の供試体よりも早く電位が低下したと考えられた。同じく図-5 に腐食電流密度の計測結果を示す。腐食速度は腐食電流密度を用いており、分極抵抗から既往の提案式を用いて腐食電流密度へ換算した。全ての供試体について、自然電位が大きく低下した時点で腐食速度が上昇していた。例として N50PS1 のかぶり 20mm の鉄筋において、自然電位が急変する前では $0.011 (\mu A/cm^2)$ 、急変した後は $0.123 (\mu A/cm^2)$ と上昇した。

鉄筋腐食発生については、かぶり 20mm の鉄筋に腐食が発生していた。一方かぶり 25mm の鉄筋に腐食は見られなかった。

電位差滴定法により求めた塩化物イオン濃度は、腐食が発生し自然電位が大きく低下した時点のものではない。そのため、図-5 から電位が低下した時点までの時間を用いて、塩化物イオン濃度の実測値からフィックの拡散方程式における表面塩分量および見かけの拡散係数を最小二乗法により算出することによって求めた。これにより、腐食発生時点での塩化物イオン濃度を求めた。5 体の平均濃度は $4.8 kg/m^3$ であった。なお、PS3 はかぶり 25mm の塩化物イオン濃度である。

本研究では、自然電位の連続モニタリングにより鉄筋の腐食発生時点を捉えることができ、自然電位が急変した時点で腐食速度も上昇することを明らかにした。普通コンクリ

ートの腐食発生限界濃度は $4.8 kg/m^3$ であることを示した。なお、フライアッシュコンクリートについては、2 年以上が経過しているが腐食の発生は認められず、鉄筋腐食に対して優れた抵抗性を有していた。

(3) X線CT法によるAEコンクリート中の気泡分布解析

本研究では、X線源にマイクロフォーカスX線源を用いるX線マイクロCT装置を使用した。このマイクロフォーカス型のX線CTを用いて得られた画像を再構成や数値演算処理して、気泡分布を立体的に抽出した。また、気泡分布を計算によって求めた。また、空隙構造をより詳細に解析するために大型放射光施設(SPring8)における実験も実施した。

X線マイクロCT装置は、X線源と検出器(高分解能カメラ)で構成される。X線マイクロCT撮影では、AEモルタルから切り出した試料を台座の上に置き、X線を照射しながらテーブルを回転させて360度分の透視画像データを収集した。そのデータから再構成計算を行い断面画像を作成した。複数の層を一度に撮影できるコーンビーム方式での画素数は 1024×1024 ピクセルで、1ピクセルのサイズは $12 \sim 14 \mu m$ である。取得するデータは、標準値である水の吸収係数を用いて換算されたCT値である。マイクロCT撮影での撮影対象は気泡であり、空気は水の吸収係数と比べると非常に小さい。取得したCT値の処理を行いモルタルの微小範囲を画像化した。さらに、数値演算処理により気泡分布を立体的に抽出した。この際、空気と固体との差別化では、抽出した気泡が占める体積割合が、フレッシュ時に測定した空気量と等しくなるように、しきい値を決定する方法を採用した。

それぞれの供試体で画像化した断面に対して、三次元の立体サンプルを抽出した。今回の解析で対象とした立体サンプルは、 $500 \times 500 \times 200$ ピクセルである。

図-6 は、空間中に分布する空気泡である。空気泡分布を、明確にするために固体部は黒で表示している。AE剤添加による気泡の導入が明らかである。球形の気泡が空間中に多数存在している。同様な気泡は、AE剤無添加のNF-NAにおいても認められるが、その数はNF-Aと比較して少ない。また、F-NAについては、微細な空隙が多数散在している。空隙形状は、明らかに球形とは異なるものも存在し、これらの空隙は凍結融解作用に対する抵抗に寄与しない気泡と思われた。

各供試体から抽出した立体サンプルに対して、気泡分布を計算した。定量化にあたって、それぞれの大小の気泡に対して、等価な直径(等価直径)を仮定した球を個々の気泡にそれぞれ外挿して、その等価直径に相当する気泡の度数分布を計算した。度数分布は、

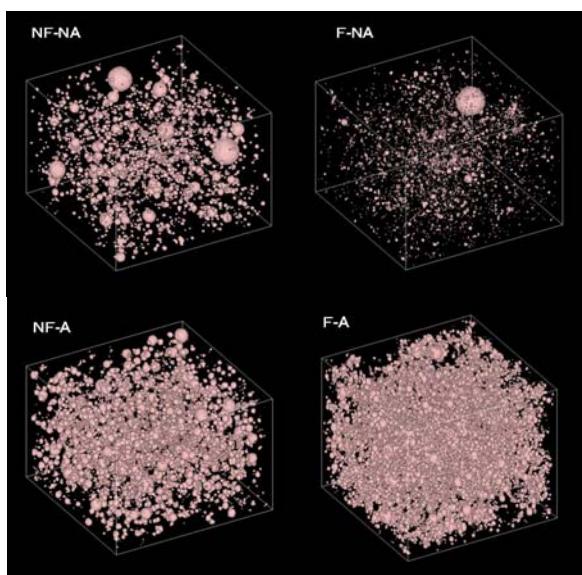


図-6 X線CT法による3次元空間の気泡分布

等価直径とその個数との関係をヒストグラムとして示した。個数が大きいほど、その等価直径に該当する気泡が多く存在すると判断した。F-A 供試体では、等価直径 $40\mu\text{m}$ の気泡が最も多く分布している。同様に、NF-A についてもこの直径の気泡が多く分布しているが、F-A と比較してその数は半分以下と少ない。AE 剤無混入の NF-NA および F-NA 供試体では、わずかながら等価直径が $1000\mu\text{m}$ の気泡が存在していた。また、F-NA では等価直径が $20\mu\text{m}$ の気泡が多数存在する結果になった。これについては、前述したように凍結融解抵抗性に寄与しない空隙と考えられる。

マイクロフォーカス型の X 線 CT 装置を用いて、AE モルタルの気泡分布を調べた結果を次のようにまとめた。結合材の種類は、普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュである。X 線 CT を用いることで、直径が $10\mu\text{m}$ 以上の気泡の立体観察が可能であった。また、AE モルタル中では、等価直径が $40\mu\text{m}$ の気泡が多く分布していた。さらに、フライアッシュを混和しても AE 剤を使用することで、6.6%の空気量の確保と等価直径が $40\mu\text{m}$ の気泡数が増加し、凍結融解作用に対して十分な抵抗性を示すと考えられた。

(4) 環境影響および耐久性の統合評価

フライアッシュコンクリートの環境影響と耐久性評価手法の統合化モデルを図-7に示す。標準材料を用いて標準耐用年数を100年とした場合との比較で示している。フライアッシュコンクリートは、廃棄物発生量を抑制することができると同時に材料段階における CO_2 発生量も少なくできる。耐久性は、寒冷地沿岸においても、凍害および塩害の抵抗性が期待できることから、図に示すモデル

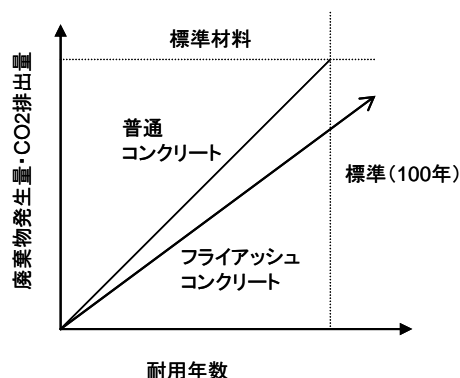


図-7 環境側面および耐久性の統合評価モデル

を提案した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

- ① T. Sugiyama, M. A. B. Promentilla, T. Hitomi and N. Takeda: Application of synchrotron microtomography for pore structure characterization of deteriorated cementitious materials due to leaching, Cement and Concrete Research, 2010(in press)(査読有).
- ② M. A. B. Promentilla and T. Sugiyama: X-ray microtomography of mortars exposed to freezing-thawing action, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 8, No. 2, 2010 (in press) (査読有)
- ③ G. M. S. Islam and T. Sugiyama: Corrosion initiation state of rebars in concrete subjected to chloride penetration, Sixth Int. Conf. on Concrete under Severe Conditions (CONSEC10), 2010 (in press) (査読有) .
- ④ M. A. B. Promentilla and T. Sugiyama, Application of Microfocus X-ray CT to Investigate the Frost-induced Damage Process in Cement-based Materials, GeoX2010: Advances in Computer Tomography for Geomaterials, pp 124-131, 2010(査読有).
- ⑤ G. M. S. Islam and T. Sugiyama: Corrosion Monitoring Rebars in Concrete under Accelerated Chloride Environment, Proceedings of 4th Int. Conf. on Construction Materials, pp255-262, 2009 (査読有).
- ⑥ M. A. B. Promentilla, T. Sugiyama, T. Hitomi and N. Takeda: Pore space analysis and estimation of transport properties of deteriorated cementitious material using synchrotron microtomography, Proceedings of the 2nd Int. RILEM workshop on Concrete Durability and Service Life Planning, pp.

498-506, 2009(査読有).

⑦鈴木健太, 杉山隆文, 川北昌宏, 志村和紀: フライアッシュコンクリートの塩分浸透性に関する実験的考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, pp. 849-854, 2008 (査読有).

⑧加邊圭太郎, 杉山隆文, 半井健一郎, 辻 幸和: 比抵抗を用いた各種コンクリートの塩分浸透評価, 材料, 日本材料学会, 第 57 巻, No. 10, pp. 1005-1010, 2008 (査読有).

⑨杉山隆文, 志村和紀, M. A. B. Promentilla, 畠田大規: X線CT法によるAEモルタル中の気泡分布観察, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 日本材料学会, 第 8 巻, pp. 99-104, 2008 (査読有).

⑩T. Sugiyama, K. Suzuki, M. Kawakita and K. Shimura: Quantitative Evaluation of Chloride Ingress in Fly Ash Concrete by Electron Probe Micro Analysis (EPMA), Proceedings of the Int. Conf. on Durability of Concrete Structures, Vol. 1, pp. 295-301, 2008 (査読有).

[学会発表] (計 4 件)

① T. Sugiyama: Environmental Impact Evaluation for Infrastructures Made of Concrete, Proceedings of US-Japan Workshop on Life Cycle Assessment of Sustainable Infrastructure Materials, Sapporo, Japan (2009.10).

② T. Sugiyama: Quantification of pore structure characteristics for deteriorated mortar due to calcium leaching, The 2nd International Workshop: Mechanisms and modelling of waste/cement interactions, Domaine de Port aux Rocs, Le Croisic, France, Oct. 14, 2008.

③増田亜由子, M. A. B. Promentilla, 杉山隆文, 人見尚: セメントペーストの X 線 CT 画像における REV 解析, 第 62 回セメント技術大会講演要旨, pp. 24-25, 2008. 5. 東京

④畠田大規, 志村和紀, 杉山隆文: モルタルの耐凍害性に及ぼす空隙の X 線 CT 法による画像観察, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 5-272, pp. 543~544, 2008. 9, 仙台

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉山隆文 (SUGIYAMA TAKAFUMI)
北海道大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 70261865

(2) 研究分担者

志村和紀 (SHIMURA KAZUNORI)
北海道大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 60187474