

機関番号：10101

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009 ～2010

課題番号：21760425

研究課題名 (和文) 混和材を用いたセメント硬化体のイメージベースモデリング

研究課題名 (英文) Image based modeling of blended cementitious materials

研究代表者

胡桃澤 清文 (KURUMISAWA KIYOFUMI)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：40374574

研究成果の概要 (和文)：

混和材を含むセメント硬化体物性を予測するために、その断面を反射電子像により観察し、微細構造を各相の量とともに自己相関関数により定量化し、それを基に3次元イメージモデルを構築した。この3次元イメージモデルを用いて硬化セメントペーストの拡散性能と力学的特性についてモデル化を行った結果、拡散性能は、C-S-Hの拡散係数をインデンテーション法によって測定した値から既往の研究に基づき推定した値を用いることにより精度よく予測できた。また、C-S-Hの弾性係数を硬化セメントペーストの応力ひずみ曲線から逆解析することにより、空隙率の関数として表すことが可能であることを示し、C-S-Hの破壊規準を明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

The section of the hardened cement paste was observed by a backscattered electron image to predict the properties of cementitious materials with mineral admixtures and quantified its microstructure by an autocorrelation function with the quantity of each phase. A three-dimensional image model was built by the supposition that each phase was distributed in the three-dimensional space in isotropic homogeneity based on them at random. Diffusion performance and mechanical properties of the hardened cement paste with this three-dimensional image model was calculated. As a result, about the diffusion performance, it was able to predict diffusivity of the hardened cement paste by using the value that it was based on a study in the past from the value that measured diffusivity of hydrates by micro-indentation method and estimated. In addition, the elastic modulus of hydrates was estimated from a stress-strain curve of the hardened cement paste reversely and it was shown that elastic modulus of hydrates is a function of the porosity and clarified that fracture criterion of hydrates was about 1,000 $\mu$  regardless of curing age and the water cement ratio.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：コンクリート、セメント硬化体、微細構造、反射電子像、3次元イメージ、拡散係数、混和材

## 1. 研究開始当初の背景

現在、建設業界以外の産業からの副産物をコンクリート用混和材として使用するケースが増加している。その主なものとしては火力発電所から排出されるフライアッシュや製鉄所から排出されるスラグがある。これらの副産物はコンクリートの混和材料として使用されない場合にはその多くが埋め立てられことになり、環境負荷の増大、さらにその廃棄場所等の減少により将来においては大きな問題となりうると考えられる。そのためこれら副産物を積極的にコンクリート用の混和材料として使用することが環境への配慮につながることであり、持続的発展可能な社会を形成する上で重要な課題の一つであると考えられる。また、近年コンクリート構造物の早期劣化が問題となっている。特に早期にコンクリートにひび割れが発生し、そのための補修補強が数多く行われているのが現状である。この原因は定かではないが、以前には見られなかった現象であるので、廃棄物を多く使用したコンクリートが一つの要因であることも考えられる。そのためこの原因解明のためにも廃棄物を使用したコンクリートの物性を微細レベルから明らかにすることはとても重要である。さらに放射性廃棄物を保管する際にコンクリートを使用することが想定されているが、その際には相の空間分布が非常に重要な問題となる。コンクリート中の水酸化カルシウムは溶解しやすくこの相が水と接した場合には外部に溶解し、構造的耐力の減少および各種物質の透過が生じやすくなってしまふ。そのためにも長期的に変化するそれぞれの相の分布位置を正確に明らかにすることが非常に重要である。

近年測定機器の発展によってマイクロレベルからさらにはナノレベルでの測定が正確に行えるようになりつつある。Ulmらはナノインデンテーション法と呼ばれる測定法を用いてナノレベルでのC-S-Hの弾性係数の測定に成功している。また、Ulmらの結果を用いてHaeckerらはセメントペーストの弾性係数の推定を行い、その結果は実験結果とよく一致していると報告している。このように推測の域を脱しなかった事象についても測定機器の開発によって明らかにされつつある。そのため、マクロなレベルで議論されていたコンクリートの物性についてさらに深い考察を加えることが可能となりつつある。しかし、これら既往の研究においてはナノレベルの測定はOPCのみでフライアッシュや高炉スラグを含んだ硬化体については検討がなされていない。

また、物質透過性を評価する上で重要な拡散係数を求めるモデルに関しては、多くのモデルが空隙の屈曲度を取り入れてモデル化しているが、この屈曲度によって拡散性能が大きく左右される結果となっている。しかしながらこの屈曲度に関しては実験結果と解析結果を整合させるパラメータであり、その正確な測定を行った研究例はなく、混和材を入れた際にはこの屈曲度が大きく変化すると報告されているがそれを空間分布として表し

た研究例はほとんどない。

## 2. 研究の目的

コンクリート構造物（セメント硬化体）には現在超長期の耐久性が求められており、これを実現するには、長期にわたって変質するセメント硬化体より精密なモデルを構築する必要がある。そこで本研究では、セメント硬化体の微細構造をSEMにより測定された実画像から自己相関関数を決定し、それに基づき3次元空間分布モデルを構築し、そのモデルに均質化法を適用することによりミクロな各相の分布を考慮したマクロな硬化体の弾性係数及び拡散係数を予測可能なモデルを構築することを目的とする。特にフライアッシュや高炉スラグ微粉末などの混和材料を使用したセメント硬化体について検討を行い、その影響を明らかにする。

## 3. 研究の方法

コンクリート中の構成物や空隙の大きさのレベルを概観すると数ナノレベルから数センチメートルまで広範囲に及んでいる。そのためそれら全てを考慮したモデルが必要であるが、オーダーが7桁も違うため、微小な部分から順次解析していくモデルを構築する。各レベルにおいては、いろいろな相が存在しておりそのレベルでの物性を推定するには正確にそれぞれの相の物性を測定し、それぞれのレベルにおいて均質化できる大きさを決定していく。その大きさの決定のために自己相関関数を用い、それに基づき3次元空間分布モデルを構築する。つまり、C-S-Hレベルでは低密度と高密度のC-S-Hとゲル空隙を含んだ系を解析し、その結果を踏まえてペーストレベルの解析を行う。ペーストレベルでは未水和セメント、水酸化カルシウム、空隙、C-S-Hを含めて解析を行う。次にモルタルとコンクリートではそれぞれの段階で骨材周辺に形成される遷移帯を含めて解析を行う。

## 4. 研究成果

混和材を用いたセメント硬化体の物性を予測するために、セメント硬化体の断面を反射電子像によって観察し、微細構造を各相の量とともに自己相関関数により定量化した。図1に観察された反射電子像の一例を示す。これは水セメント比50%の材齢28日であり、白い部分が未水和セメント粒子を示し、明灰色が水酸化カルシウム、暗灰色がC-S-H及びその他の水和物、黒色が空隙を示す。未水和セメント粒子及び粗大空隙はほとんど観察できず、水酸化カルシウムやC-S-Hが大部分の面積を占めていることがわかる。また、図2にそれら各相の自己相関関数を計算した結果を示す。自己相関関数は各相のある距離における存在確率を示しており、距離0における量はその存在量を示し、ランダムに配置されている場合には距離無限大において存在量の二乗値に収束する。よってセメント硬化体の各相はランダムに分散している構

造であることが示唆された。特に普通ポルトランドセメントの硬化体においては水酸化カルシウムの自己相関関数が特徴的な分布を示している。

自己相関関数を基に各相が等方的均質にランダムに3次元空間に配置されている仮定により3次元イメージモデルを構築した。その一例を図3に示す。図中で白い部分は未水和セメントを示し、暗灰色は水酸化カルシウム、黒色は空隙を示している。1辺の大きさは32 $\mu\text{m}$ であり、周期境界条件を課している。

この構築した3次元イメージモデルを用いて硬化セメントペーストの拡散性能と力学的特性についてモデル化を行った。拡散性能については有限差分法を用いて、拡散係数は定常状態においては電気伝導度と同様であるとの仮定を用いて空隙には自由水中の塩化物イオンの拡散係数を、C-S-Hの拡散係数にはマイクロインデンテーション法によって測定した値から既往の研究に基づき推定した値を用いた。その結果、硬化セメントペーストの拡散係数を予測することができた。

また、硬化セメントペーストの弾性係数及び圧縮強度推定には非局所型の非線形ボクセル有限要素法を用いた。C-S-Hの弾性係数を硬化セメントペーストの応力ひずみ曲線から逆解析することによって推定し、図4に示すように空隙率の関数として表すことが可能であることを示し、C-S-Hの破壊規準に関しては材齢、水セメント比にかかわらず約1000 $\mu$ であることを明らかにした。

コンクリートの弾性係数及び圧縮強度に関しては骨材、モルタル及び遷移帯の弾性係数、ポアソン比、破壊エネルギー及び破壊規準を既往の研究から算出した値を用いてモデル化することにより推定することが可能であることを示した。その結果を図5に示す。骨材種類によって推定値と実測値において差のある水準もあったがおおむね同様の値を得ることができた。

さらにこれらの3次元イメージモデルを用いて、硬化体中の水酸化カルシウムが溶脱した際の拡散係数の増加及び弾性係数、圧縮強度の低下を定量的に予測することが可能となった。また、溶脱がさらに進行した際の硬化セメントペーストの物性を、C-S-Hの溶脱による劣化を考慮することにより推定する手法について検討を行った。その結果を図6に示す。図6は硬化セメントペーストを硝酸アンモニウムによって促進劣化させて異なるCa/Si比のC-S-Hの弾性係数から拡散係数を推定した結果とその値を用いて硬化セメントペーストのマクロな拡散係数を推定した結果である。健全な試料においてはC-S-Hの拡散係数がマクロな拡散係数を支配していることが示されたが、促進劣化させCa/Si比が低下した部分においてはC-S-Hの拡散係数の低下の程度以上にマクロな硬化セメントペーストの拡散係数が上昇しており、水酸化カルシウムの溶脱による粗大空隙の増加が大きく影響していることを明らかにした。

これらの結果から超長期にわたって劣化するセメント硬化体の拡散性能および力学的性能を予測することが可能となり、今後のコンクリート構造物の構造、耐久性設計に大いに役立つことが示唆された。また、既存のコンクリート構造物の微細構造を調査することにより劣化の程度及び劣化予測が可能となると考えられる。

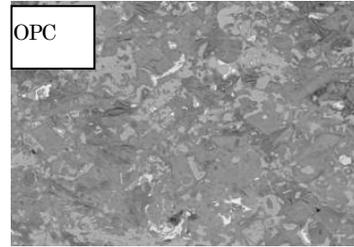


図1 セメント硬化体の反射電子像

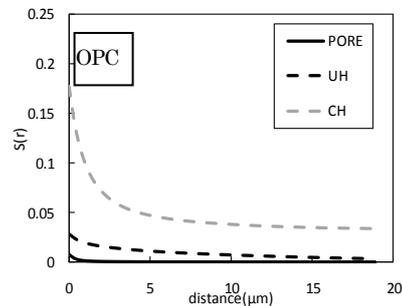


図2 各相の自己相関関数

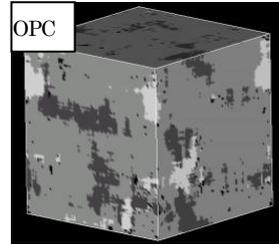


図3 構築したセメント硬化体の3次元イメージ

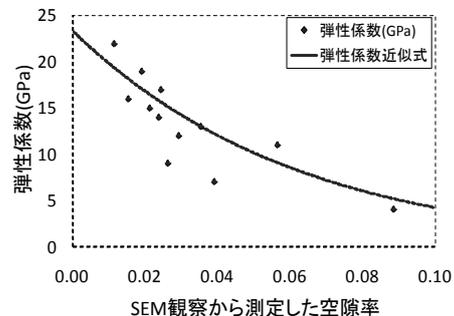


図4 水和生成物の弾性係数と空隙率の関係

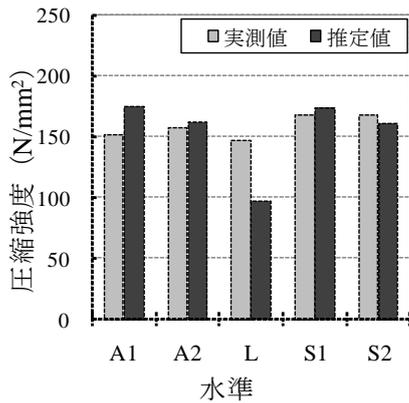


図5 各種骨材を用いたコンクリートの圧縮強度の推定値と実測値

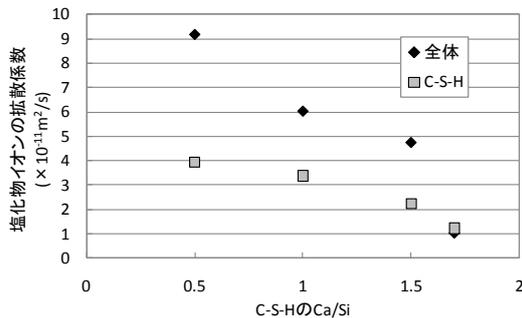


図6 異なるCa/Si比のセメント硬化体の塩化物イオンの拡散係数の推定値

### 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9件)

- 1) 福島浩樹、石森正俊、胡桃澤清文、名和豊春：乾湿繰り返しによるセメント硬化体の収縮・膨張挙動、セメント・コンクリート論文集、No.64、pp.74-81、2010 (査読あり)
- 2) 青山琢人、胡桃澤清文、名和豊春、大和田仁：セメント硬化体の3次元イメージモデルによる塩化物イオンの拡散予測、セメント・コンクリート論文集、No. 64、pp. 66-73、2010 (査読あり)
- 3) Y. Elakneswaran, A. Iwasa, T. Nawa and K. Kurumisawa: Ion-Cement Hydrates Interactions Governed Multi-Ionic Transport Model for Cementitious Materials, Cement and concrete research, Vol. 40, pp. 1756-1765, 2010(査読あり)
- 4) 永井 学志, 池田 翔太, 胡桃澤 清文:硬化セメントペーストの圧縮強度評価に対する非線形ボクセル有限要素解法とその適用可能性, 日本計算工学会論文集, 20100012, 2010 (査読あり)
- 5) 池田 翔太, 永井 学志, 胡桃澤 清文: イメージベースモデリングによるセメントペーストの弾性係数推定に関する基礎的検討, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp499-504, 2009 (査読あり)

6) 福島 浩樹, 中江 理, 胡桃澤 清文, 名和 豊春: 乾燥収縮低減剤を用いたモルタルの強度低下メカニズムの一考察, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 589-594, 2009 (査読あり)

7) 石森 正俊, 名和 豊春, 胡桃澤 清文: 石灰石砕砂を用いたモルタルの強度発現と乾燥収縮に関する研究, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 109-114, 2009 (査読あり)

8) 胡桃澤清文, 名和豊春: セメント硬化体の3次元イメージモデル構築と動弾性係数, 日本建築学会構造系論文集, NO. 642 P. 1405 2009年8月 (査読あり)

9) Y Elakneswaran, T Nawa, K Kurumisawa: Electrokinetic potential of hydrated cement in relation to adsorption of chlorides, Cement and Concrete Research, 2009, Volume 39, Issue 4, pp. 340-344, 2009 (査読あり)

[学会発表] (計2件)

1) 胡桃澤清文、名和豊春：Reconstructing three-dimensional spatial model of blended cement pastes by using backscattered electron image、第64回セメント技術大会、pp.24-25、2010.5.27、ホテルメトロポリタン、東京

2) 胡桃澤清文、名和豊春：反射電子像と水銀圧入法によるセメント硬化体の空隙構造測定、日本建築学会学術講演会、2010年9月11日、富山大学、富山

### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

胡桃澤 清文 (KURUMISAWA KIYOFUMI)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：40374574

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし