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

DYNAMIC ELASTIC MODULUS OF CEMENT BASED MATERIALS PREDICTED BY ITS MICROSTRUCTURE

胡桃澤 清文*, 名和 豊春**

Kiyofumi KURUMISAWA and Toyoharu NAWA

For achievement of long-term durability of concrete structures, it is important to get knowledge about properties of concrete. Nowadays, properties of concrete are determined by experimental or predicting from empirical equation. However, it is difficult to predict concrete properties at long-term, because it is impossible to do experiment. Therefore, it is necessary to make a model by considering its microstructure. Microstructure is a key for predicting the properties of concrete. Some properties are determined by microstructure such as C-S-H, calcium hydroxide, pores, unhydrated cement particles, interfacial transition zone and these interactions. In this study, we investigated dynamic elastic modulus of hardened cement pastes in view point from microstructure. Backscattered electron image was used for acquiring the microstructure image and autocorrelation function (ACF) of each phase was calculated by these images. The ACF was applied for reconstructing three dimensional structures from two dimensional images. Finally, three dimensional structures were used for calculating dynamic elastic modulus of specimen. It was cleared that the prediction result of dynamic elastic modulus used with micro indentation result was good agreement with experimental result in high W/C.

Keywords : *Microstructure, Backscattered electron image, Autocorrelation function, 3D image model, Finite element method, Dynamic elastic modulus*

微細構造、反射電子像、自己相関関数、3次元イメージモデル、有限要素法、動弾性係数

1. はじめに

近年、コンクリート構造物には長期耐久性が求められる場面が多くなっている。コンクリートの耐久性は実験的に決められた実験式によって決定される場合が現在の主流であるが、長期にわたって様々な環境にさらされるコンクリート構造物の耐久性を予測する上でその手法にも限界があると考えられる。そのためコンクリートの微細構造を考慮した予測手法が必要であると考えられる。微細構造を考慮した予測モデルは数多く提案されているが、C-S-Hや水酸化カルシウム、空隙等の空間配置を考慮したモデルはほとんどない。特に空隙構造に着目しその物性を予測するモデルが多く、その際に用いられる空隙は水銀圧入法によって求められたものがほとんどである。しかし、水銀圧入法によって得られた空隙構造のデータはインクボトル効果や加圧による変形の影響を含んでおり、また、小径の空隙の過大評価などの問題点が指摘されている¹⁾。つまり、真の空隙構造を水銀圧入法によって測定することは難しく相対的な評価に用いられている。

一方、反射電子像による空隙の評価が盛んに行われるようになり、水銀圧入法の結果とは異なり粗大な空隙が多く存在していることが

指摘されている²⁾。また、五十嵐ら³⁾は反射電子像から粗大空隙や未水和セメント粒子などを抽出しそれらの2点間相関関数から構造的な分布を明らかにしており、今後さらに反射電子像によってセメント硬化体の物性評価が行われるようになると考えられる。しかし、これら反射電子像測定から得られた各相の分布情報と物性を関連付ける際には実際の3次元的な構造が必要であると考えられる。なぜなら空隙は3次元で連続しており、2次元のつながりとは異なることが予想される。また、3次元構造を直接観察する方法としてX線CT法があげられるが、この手法では微細な組織を測定するためには相当の時間を要し、その分解能は数 μm 程度であり、各相の識別も困難である。

そこで本研究においては反射電子像によって得られた2次元断面の情報を基に3次元モデルを構築し、その3次元モデルから動弾性係数の推定を行うことを目的とする。3次元モデルによって弾性係数を推定するには内部に生じる応力集中を評価することも可能であり材料評価を行う上でとても有用である。

既往の研究において、マクロな圧縮強度などの評価は空隙率によって主に行われており⁴⁾⁵⁾、ミクロな C-S-H 構造がどのようにマク

* 北海道大学大学院工学研究科環境循環システム専攻
准教授・工博

** 北海道大学大学院工学研究科環境循環システム専攻
教授・工博

Assoc. Prof., Division of Solid Waste, Resources and Geoenvironmental Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Dr. Eng.

Prof., Division of Solid Waste, Resources and Geoenvironmental Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Dr. Eng.

ロな物性に影響を与えているか明らかにされていない。C-S-H はセメント系材料の固体部分の約 60%以上を占めそれが固体の骨格を形成しているため、強度などの力学的特性に及ぼす影響は大きいと考えられる。本研究では特にセラミックスや金属の分野でマイクロ弾性係数の測定法として適用されているインデンテーション法をセメント硬化体に適用して C-S-H の力学特性の評価を行う。インデンテーション法は Oliver ら⁶⁾によって開発され、ナノからマイクロオーダーの弾性係数を局所的に測定することが可能な手法であり現在広く使用されている手法である。

2. 実験概要

2.1 試験体作製

セメントは普通ポルトランドセメント (OPC、密度：3.16g/cm³、比表面積：3450cm²/g) を用いた。水セメント比は40、60、80、100%とし練混ぜはミキサーを用い、注水後30秒間練混ぜ、その後練返しを行い、3分間再度練りまぜを行った。打込みは直径50mm、高さ100mmの円柱型枠に行った。なお、高水セメント比の試料は、ブリーディング水が生じなくなるまで一定時間置きに練り返しを行った後に打込みを行った。24時間封緘養生をした後に、所定の期間まで20℃及び50℃の水中養生を行い異なる微細構造をもつ多様な硬化セメントペーストの作製を行った。表1に試験体の略号を示す。

表1 試験体の略号

W/C(%)	20℃水中養生	50℃水中養生
40	40-20	40-50
60	60-20	60-50
80	80-20	80-50
100	100-20	100-50

2.2 反射電子像による相分布の測定

試料は所定の材齢において、試験体から1辺が5mm角程度の立方体をアセトンに24時間以上浸漬し、セメントの水和反応を停止させた後に、真空乾燥を行い、その後エポキシ樹脂で包埋し、その表面の研磨を行った。研磨は耐水研磨紙を用いて粗研磨を行い、最終研磨は0.25μmのダイヤモンドペーストを使用した。測定は、加速電圧15keV、ワーキングディスタンス17mm、倍率500倍にて行い、それぞれの試験体において16箇所以上の反射電子像 (BEI) の測定を行った。なお、16ビットで画像を取得し一画素の大きさは0.32μmである。相の分布は、画像解析ソフトを用いて測定された輝度の違いによって未水とセメント粒子 (UH)、水酸化カルシウム (CH)、C-S-Hを含む水和生成物 (C-S-H)、粗大空隙 (pore) の4つの相に分離を行った。相の分離は各相の輝度の分布が正規分布するとしてそれぞれ異なる相の分布が最小値となる谷となる値で行った。なお、本手法で得られる未水とセメント量及び水酸化カルシウム量は既往の研究²⁰⁾²¹⁾において比較検討を行っており、未水とセメント量はX線回折の測定値とほぼ一致し、水酸化カルシウム量はX線回折の結果と最大5%程度の差であった。

2.3 マイクロインデンテーション法によるマイクロ弾性係数の測定

マイクロインデンテーション法⁶⁾は、フィッシャーズスコープを

図1 原画像から各相の抽出

用い反射電子像測定と同じ試料の表面を用い行った。試料表面に圧子を用いてインデントを行い、荷重の負荷と除荷を行い徐荷する際に測定された荷重-押し込み深さ曲線の傾きを基にマイクロ弾性係数を算出した。最大荷重を20mNとし、载荷速度は1.0mN/sとした。測定箇所は約10μm間隔で格子状に10×10点測定を行い、それぞれの試料で100点の測定を行った。

2.4 超音波法による動弾性係数測定

動弾性係数 E は、50φ×100mmの円柱供試体を用い超音波速度を測定し、次式(1)によって算出した¹⁸⁾。

$$E = V_p^2 \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (1)$$

ここで、 V_p : 超音波速度(cm/s)、 ρ : 試料密度(g/cm³)、 ν : 試料のポアソン比である。P波を試験体の片面から共振周波数 10MHz の水晶振動子にて発生させ、その反対面から超音波を検出し伝播速度を算出した。受信波の卓越周波数は約 55kHz であった。なお、測定を簡便に行うためにS波の測定は行わずポアソン比は全ての試料において 0.3 と仮定し計算を行った。

3. 自己相関関数と3次元構築

3.1 自己相関関数

自己相関関数は、図1に示すように着目する各相とその他の相を2値化によって抽出し、その関数を求めた。M×N画素からなる画像から得られる自己相関関数 $S(x,y)$ は以下の式(2)によって求めた。

$$S(x,y) = \sum_{i=1}^{M-x} \sum_{j=1}^{N-y} \frac{I(i,j) \times I(i+x,j+y)}{(M-x) \times (N-y)} \quad (2)$$

ここで $I(x,y)$ は座標 (x,y) の画素が目的の相 (たとえば空隙等) である場合は1、その他は0として計算を行う。ここで $S(x,y)$ を決定した後、 $S(x,y)$ を極座標での自己相関関数 $S(r)$ に変換する。このとき

$r = \sqrt{x^2 + y^2}$ である。(3)式に $S(r)$ を示す

$$S(r) = \frac{1}{2r+1} \sum_{l=0}^{2r} S\left(r, \frac{\pi l}{4r}\right) \quad (3)$$

ここで、 $S(r,\theta) = S(r \cos \theta, r \sin \theta)$ である。

3.2 3次元イメージモデルの構築

3次元イメージの構築は、Quiblier⁷⁾や Yeong and Torquato⁸⁾によって2次元画像から得られた構造統計量をもとに3次元イメージを再現する手法が提案されているが、本研究ではBentzら⁹⁾が提案するモデルを用いた。モデルは2次元画像から得られた自己相関関数のとおり各相が等方的、ランダムに3次元空間に分布していると仮定して構築を行っている。空間分布を確認する手段としてはX線CTによる測定が考えられるが、分解能の問題から現段階では確認することはできない。モデルにおいてそれぞれの相の存在量は、反射電子像測定から得られた量が空間に存在するものとして計算を行った。各相ははじめに空間内にランダムに配置し、ある着目する点 $M(x,y,z)$ と自己相関関数を基に作成した式(4)に示すフィルター $F(x,y,z)$ の積を計算し、その計算した値 $R(x,y,z)$ の最大と最小の区間を500分割する。そして相の存在量に相当する閾値を設け、 $R(x,y,z)$ がそれ以下である場合はその点は元の相のままとし、それ以外は着目した相に変更を行う。 $R(x,y,z)$ を式(5)に示す。なお、 $31 \times 31 \times 31$ ボクセルの大きさと畳み込みを行いモデルの構築を行った。

$$F(x,y,z) = F(r) = \frac{S(r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}) - S(0) \times S(0)}{[S(0) - S(0) \times S(0)]} \quad (4)$$

$$R(x,y,z) = \sum_{i=0}^{30} \sum_{j=0}^{30} \sum_{k=0}^{30} N(x+i, y+j, z+k) \times F(i,j,k) \quad (5)$$

また、本研究では1つのボクセルの大きさは反射電子像測定と同様に $0.32\mu\text{m}$ とし、構築したモデルの大きさは1辺100ボクセルであり、1辺の長さは $32\mu\text{m}$ である。境界条件として全周囲に周期境界条件を与えた。

4. 動弾性係数推定

4.1 Self-Consistent 解析

反射電子像から得られた各相の比率から動弾性係数を推定するためにSelf-consistent解析(SCA)¹⁰⁾を行った。SCAの詳細については既往の研究¹¹⁾に従い行った。SCAはある相の中に異なる別の相が存在するときのそれらの相互作用を考慮し全体の有効物性を計算する方法であり、数多くの検討が既往の研究²²⁾で行われておりその有用性は確認されている。なお、下記に示す式により計算を行った。

$$E = \frac{9k\mu}{3k + \mu} \quad (6)$$

$$k = \sum_r f_r k_r \left(1 + \alpha \left(\frac{k_r}{k_0} - 1 \right) \right)^{-1} \times \left[\sum_r f_r \left(1 + \alpha \left(\frac{k_r}{k_0} - 1 \right) \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (7)$$

$$\mu = \sum_r f_r \mu_r \left(1 + \beta \left(\frac{\mu_r}{\mu_0} - 1 \right) \right)^{-1} \times \left[\sum_r f_r \left(1 + \beta \left(\frac{\mu_r}{\mu_0} - 1 \right) \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{3k_0}{3k_0 + 4\mu_0} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{6(k_0 + 2\mu_0)}{5(3k_0 + 4\mu_0)} \quad (10)$$

ここで、 E : 動弾性係数(GPa)、 k : 体積弾性係数(GPa)、 μ : せん断弾性係数(GPa)、 f : 各相の体積率を示す。添え字の r は着目する相、 0 は初期値を示している。それぞれの係数は、表2に示す既往の文献の値を用いた¹⁰⁾。なお、本研究で用いた試料は水中養生であり粗大空隙内は水で満たされているため、粗大空隙の値は水の体積弾性係数とせん断弾性係数を用いた。

4.2 有限要素法

動弾性係数の推定にはGarbocziによって開発された共役勾配法によって有限要素法を解くプログラムであるelas3D¹²⁾を用いて応力-ひずみ関係の計算を行った。既往の研究¹³⁾において2次元画像を用い検討を行っているが、今回は作成した3次元モデルを用いて動弾性係数の検討を行った。なお、構築したモデルの大きさが1辺 $32\mu\text{m}$ であり、その微細モデルに微小変位を与え計算を行っているため求める物性値は静弾性係数ではなく動弾性係数とした。体積弾性係数とせん断弾性係数の入力値はSCAと同様に表2に示す値を用い粗大空隙には水の値を用いた。境界条件は周期境界条件、要素数は 100^3 であり各要素は6面体要素で、アイソパラメトリック要素を用い、それぞれのボクセルに対応する各相の体積弾性係数とせん断弾性係数を割り当て計算した。

表2 各相の体積弾性係数とせん断弾係数¹⁰⁾

	体積弾性係数(GPa)	せん断弾性係数(GPa)
未水和セメント	105.2	44.8
水酸化カルシウム	40.0	16.0
C-S-H	14.9	9.0
粗大空隙 (水)	2.0	0.0

5. 水和反応モデル

水和反応モデルはJenningsら¹⁴⁾¹⁵⁾のモデルを用いた。水和反応は以下の各式(12)によって進行すると仮定した。また、水和反応率 α は式(13)に従って時間 t とともに進行し、それぞれの係数 a 、 b 、 c は表3に示すように既往の研究¹⁴⁾に基づき入力した。空隙量は初期の水分が水和反応によって減少していくとして計算を行い、残存セメント(未水和セメント)、水和生成物及び残存する水に対する比率から計算を行った。なお、 i は着目する相を示している。

$$\alpha_i = 1 - \exp(-a_i(t - b_i)^{c_i}) \quad (13)$$

表 3 各相の a_i, b_i, c_i ¹⁴⁾

Phase	a_i	b_i	c_i
C ₃ S	0.25	0.9	0.7
C ₂ S	0.46	0.0	0.12
C ₃ A	0.28	0.9	0.77
C ₄ AF	0.26	0.9	0.55

図 2 動弾性係数の経時変化

図 3 自己相関関数の計算例 (材齢 28 日)

6. 結果と考察

6.1 動弾性係数測定結果

図 2 に動弾性係数の測定結果を示す。水セメント比の高い方が動弾性係数は低い値を示した。20℃で養生した試験体は材齢初期の 7 日では動弾性係数は低い値を示すが、材齢 28 日以降では 50℃で養生したものよりも高い値を示した。また、50℃で養生した試験体は

図 4 3次元イメージ (材齢 28 日、黒：空隙、白：未水和セメント、暗灰色：水酸化カルシウム、明灰色：C-S-H、1 辺 32μm)

材齢 28 日から材齢 91 日において動弾性係数の変化が見られないが、20℃養生した試験体は材齢とともに高くなる傾向を示した。このように動弾性係数が大きく異なる試験体を作製することができた。

6.2 自己相関関数

図 3 に 3.1 に基づき自己相関関数を計算した結果の一例を示す。上図は材齢 28 日の水セメント比 40%、下図は、材齢 28 日、水セメント比 100%の計算結果を示している。それぞれの計算結果は 16 枚

の測定した反射電子像から抽出した値の平均値を示している。自己相関数が距離 0 における値は、その相がどれだけ画像中に存在しているかを示している。つまり、各相の存在量（面積率）を示している。距離が離れるにつれてその確率は減少していく。その減少は存在確率の 2 乗に収束し画像中にランダムに配置された場合の値と等しくなり、それまでの範囲が着目する相の特徴を表しており構造距離と呼ばれている。図より水セメント比が異なる場合にはその存在量が異なるため、距離 0 における値が異なり、着目相ごとにその構造距離が異なることがわかる。水セメント比 40% の未水和セメントの場合には 20 μm まで構造距離が広く分布している結果であり水セメント比 100% の場合には空隙が広く分散している。

6.3 3次元モデル構築

材齢 28 日、養生温度 20 $^{\circ}\text{C}$ の異なる水セメント比の試料を 3.2 に基づき構築した 3 次元モデルの結果を図 4 に示す。図中で黒は空隙、明灰色は C-S-H、暗灰色は水酸化カルシウム、白は未水和セメントを示している。水セメント比の違いによって異なる構造をもつモデルを構築することができた。しかし、本研究では簡易にモデルを作成するために各相がもつ表面積等に関する補正を行わなかったため実際の 3 次元構造と異なる可能性があり、今後さらに詳細に検討を行う必要があると考えられる。

6.4 SCA による結果

図 5 に材齢 28 日における 4.1 の SCA によって得られた動弾性係数の計算結果と実測値の比較を示す。各相の比率を反射電子像の測定結果によって計算した結果を○印で示しており（0.32 μm 以上の粗大空隙のみを含む:large）、△印は反射電子像で測定された C-S-H 相中に検出できていない空隙があると仮定し、その空隙量を 5. 水和反応モデルによって補正した結果（空隙すべてを含む:large+fine）を示している。補正計算に用いた未水和セメント量及び水酸化カルシウム量は補正前と同様に反射電子像から得られた実測値を用い、空隙量は水和反応モデルで試算した値、C-S-H 量は空隙量を補正した際に全体積比の総和が 1 となるように計算した値を用いた。この結果より補正前の SCA による動弾性係数値は実測値よりも高い値を示しているが、水和反応モデルによって空隙量を補正した結果はほぼ実測値と一致した。このことから五十嵐ら¹⁶⁾も指摘しているように反射電子像による測定は、動弾性係数の値に影響を及ぼすような空隙を検出できていないことが示唆された。

6.5 有限要素法による解析結果

図 6 に 3 次元モデルを用い 4.2 の有限要素法によって動弾性係数を解析した結果を示す。有限要素法によって解析した結果は実測値よりも高い値を示しており SCA と同様の結果であった。ここで図 7 に材齢 28 日における SCA の計算値と比較した結果を示す。両者は 6% 程度異なる値を示したが、その値はほぼ一致しており相の存在量が同一であるときの 3 次元モデルを用いた FEM による動弾性係数推定の妥当性を示すことができた。

6.6 マイクロ弾性係数の適用

図 8 にマイクロインデンテーション法によって得られた材齢 28 日の C-S-H のマイクロ弾性係数の中央値を示す。水セメント比が小さく養生温度が高いほどその値は高い結果であった。つまり、C-S-H の弾性係数は水セメント比や養生温度によって変化することが示唆された。これは Jennings ら¹⁹⁾も指摘しているように C-S-H の凝集

図 5 SCA によって得られた弾性係数と実測値の比較

図 6 FEM によって計算した動弾性係数と実測値

図 7 SCA と FEM により計算した動弾性係数の比較

図 8 インデンテーション法によって得られたマイクロ弾性係数(材齢 28 日)

図9 マイクロインデンテーション法により得られたC-S-Hの弾性係数を用いて計算した動弾性係数と実測値の比較(材齢28日)

図10 FEMにおける応力分布図(材齢28日、左:W/C:40%、右:W/C:100%)

図11 FEMにおける応力の度数分布(材齢28日)

の違いによるものであると考えられる。

図9にマイクロインデンテーション法によって得られた弾性係数値をC-S-Hの弾性係数として入力しFEMにより動弾性係数を計算した結果と実測値との比較を示す。なお、C-S-Hのポアソン比は0.24とした。水セメント比40%の結果を除いてその値はほぼ等しくマイクロインデンテーション法によって得られたC-S-Hのマイクロ弾性係数を入力することにより動弾性係数の推定は可能であると考えられる。水セメント比40%の計算結果が異なる原因としてマイクロインデンテーション法によって得られたC-S-Hのマイクロ弾性係数値が高いためであると考えられる。これはマイクロインデンテーション法においてC-S-Hの周囲に存在する未水和セメント粒

子等が測定値に影響を及ぼしているためであると考えられる。そのため40%以下の低水セメント比領域においてはマイクロインデンテーション法によるC-S-Hのマイクロ弾性係数測定は本研究とは異なる測定条件を設定する必要があることが示唆された。しかし、水セメント比60%以上においてはマイクロインデンテーション法によってC-S-Hの弾性係数、反射電子像測定結果から構築した3次元イメージモデルとFEMを用いることにより巨視的な動弾性係数を推定することが可能であると考えられる。なお、動弾性係数は含水率の影響を受けるため¹⁷⁾、本研究における測定値は水分量と空隙構造の2つの要因を含んだ結果であり、今後含水率の影響を考慮した測定・解析を行う必要がある。

最後にFEM計算結果の解析例として、材齢28日の水セメント比40%、100%の応力分布図を図10、その応力の度数分布を計算した結果を図11に示す。図10に示すように同一のひずみを与え計算した結果、水セメント比40%では硬化体全体として高い応力が分布している様子がみられ、100%では低い応力が多く分布している様子が観察でき、高い応力を負担している部位は未水和セメントや水酸化カルシウムである。また、度数分布の結果から水セメント比100%では2MPa程度の応力に分布が集中し、水セメント比40%では7MPa程度の応力に分布が集中している。これら個々の要素にかかる応力と破壊強度との関係を考慮することにより硬化体としての破壊強度の推定が可能となると考えられる。しかし、これらの結果はすべての相を弾性体と仮定した結果であり、各相の強度や相同士の接着強度を考慮したものではないためこの点は今後の課題である。

7. 結論

セメント硬化体の反射電子像測定により得られた2次元断面画像から3次元イメージモデルを構築し、それを解析した結果以下の結論が得られた。

- (1) 反射電子像によって得られた画像とそこから得られた自己相関数を用いてセメント硬化体の3次元構造モデルを簡易に構築する手法を提案した。
- (2) 反射電子像によって測定された画像では分解能の問題のため0.32 μm 以下の微細な空隙がC-S-H相として検出される。そのため既存の水和反応モデルによって空隙量の補正を行う必要がある。
- (3) マイクロインデンテーション法によって得られたC-S-Hのマイクロ弾性係数と、反射電子像から構築した3次元イメージに有限要素法を適用することにより巨視的な動弾性係数を予測する手法を提案した。この手法により、水セメント比60%以上の水中養生を行った硬化セメントペーストにおいて動弾性係数を精度よく推定することができた。

謝辞

測定にあたって北海道大学大学院工学研究科 奈良禎太氏、北海道立工業試験所 金野 克美氏にご協力を頂いた。本研究の一部は科研費(21760425)の助成を受けたものである。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) Dexiang Shi, Douglas N. Winslow : Contact angle and damage during

- mercury intrusion into cement paste, *Cement and Concrete Research*, Vol.15, No. 4, pp. 645-654, 1985
- 2) Sidney Diamond: Mercury porosimetry: An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, Vol.30, No.10, pp.1517-1525, 2000
- 3) 五十嵐心一、米山義広、渡辺暁央：水和反応の進行にともなうセメントペースト構成相の空間分布構造の変化、*土木学会論文集 E*、Vol.63、No.3、pp.444-458、2007
- 4) Y.W. Mai and B. Cotterell: Porosity and mechanical properties of cement mortar, *Cement and Concrete Research*, Vol.15, No.6, pp.995-1002, 1985
- 5) T.C. Powers: Structure and physical properties of hardened Portland cement paste, *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol.41, No.1, pp. 1-6, 1958
- 6) W.C. Oliver and G.M. Pharr: An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, Vol.7, pp. 1564-1583, 1992
- 7) Quiblier, J.A.: A new Three-Dimensional Modeling Technique for Studying Porous Media, *J. Colloid and Interface Sci.*, Vol.98, pp.84-103, 1984
- 8) Yeong, CLY. and Torquato, S. : Reconstructing random media II. Three-dimensional media from two-dimensional cuts, *Phys.Rev.E*, Vol.58, pp.224-233, 1998
- 9) Dale P. Bentz, CEMHYD3D: A Three-Dimensional Cement Hydration and Microstructure Development Modelling Package Version 2.0, NISTIR 6485, 2000
- 10) Olivier Bernard, Franz-Josef Ulm and Eric Lemarchand: Multiscale micromechanics - hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, Vol.33, pp. 1293-1309, 2003
- 11) 胡桃澤 清文、名和 豊春、奈良 禎太：セメント硬化体の微細構造と弾性挙動、*コンクリート工学年次論文集*、Vol.30、No.1、pp.591-596、2008
- 12) E.J. Garboczi: Finite Element and Finite Difference Programs for Computing the Linear Electric and Elastic Properties of Digital Images of Random Materials National Institute of Standards and Technology, Internal Report 6269, 1998
- 13) 胡桃澤清文、Pipat Termkhajornkit、名和豊春：反射電子像及び元素分布像を用いた硬化セメントペーストの力学的性質の推定、*日本建築学会構造系論文集*、No.603、pp.9-16、2006.5
- 14) H.M. Jennings: A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste, *Cement and Concrete Research*, Vol.30, pp.101-116, 2000
- 15) Paul D. Tennis, Hamlin M. Jennings: A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 6, pp.855-863, 2000
- 16) S. Igarashi, M. Kawamura, A. Watanabe : Analysis of cement pastes and mortars by a combination of backscatter-based SEM image analysis and calculations based on the Powers model, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, pp.977-985, 2004
- 17) 岡島達雄、一瀬賢一：コンクリートの強度および弾性定数の含水率依存性、*セメント技術年報*、No.36、pp.211-213、1982
- 18) 山口梅太郎、西松裕一：岩石力学入門、pp.205-211、東京大学出版、1994
- 19) H.M. Jennings et al: A multi-technique investigation of the nanoporosity of cement paste, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 3, pp. 329-336, 2007
- 20) 胡桃澤清文、名和豊春：反射電子像及びエネルギー分散型線分析により測定した元素分布像による硬化セメントペーストの観察、*日本建築学会構造系論文集*、No.595、pp.9-16、2005.9
- 21) 蛭川泰卓、名和豊春、胡桃澤清文：XRD リートベルト法によるエコセメントの水和解析、*セメント・コンクリート論文集*、No.60、pp.134-141、2006
- 22) S.Torquato: *Random Heterogeneous Materials: microstructure and macroscopic properties*, Springer, 2001

(2008年12月15日原稿受理、2009年4月16日採用決定)