

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 1 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360204

研究課題名（和文）水和物評価に基づくセメント系硬化体の物質移動性の定量評価手法の構築

研究課題名（英文）Estimation of mass transfer in hardened cementitious materials based on the properties of hydration products

研究代表者

佐伯 竜彦 (SAEKI TATSUHIKO)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：90215575

研究成果の概要（和文）：本研究では、個々の水和物の性質を積算することによって、硬化体全体の物質移動性を評価する手法を構築することを目的とした。セメント系材料の主要水和物である C-S-H の組成と物理的性について検討し、C/S モル比と密度および C/S モル比と比表面積の関係は、C-S-H 生成起源によらずそれぞれ一つの直線式で表すことができることを明らかにした。C-S-H の比表面積およびゼータ電位と関係の深い微細空隙の量から酸素および塩化物イオン拡散係数を推定する手法を構築した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to formulate the prediction method of mass transfer in concrete based on the properties of hydration products.

Composition and physical properties of C-S-H, which is dominant hydration products of cementitious materials, were studied. From the experimental results, the relation between density of C-S-H and C/S molar ratio and the relation between specific surface area of C-S-H and C/S molar ratio were formulated as linear equations respectively independent of source of C-S-H. Diffusion coefficients oxygen and chloride ion through concrete can be predicted by using of the surface area of C-S-H and the volume of micro pore.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	5,300,000	1,590,000	6,890,000

研究分野：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：セメント，水和物，物質移動，拡散

## 1. 研究開始当初の背景

近年、コンクリートに高強度、高耐久性さらには環境負荷低減性など様々な性能が求められるようになってきている。即ち、求められる性能が高度化・多様化し、それに対応するために使用材料や配合が多様化してきている。

一方で、資源の有効利用などの目的で多種多様な副産物や廃棄物がコンクリート用材料として用いられるようになってきている。今後も様々な副産物・廃棄物が原料あるいは混合材としてセメントやコンクリートに持込まれることも考えられる。しかしながら、副産物・廃棄物は一般に品質の変動が大きく、これらを継続的に有効利用していくためには材料が変動しても所要の性能のコンクリートを安定して製造する技術が必要となる。

以上の背景から、コンクリートが所要の性能を満足できるよう材料・配合の選定を的確に行える材料・配合設計手法、即ち、種々の材料・配合に対応可能な性能照査手法が求められている。

## 2. 研究の目的

セメント硬化体は水和生成物（+未水和物）の集合体であることから、その性質は当然、生成する水和物の種類と量に依存する。したがって、個々の水和物の性質を把握しそれを積算していくことによって硬化体全体の性質を推定することが可能と考えられる。このような手法に、適切な水和モデルを組み合わせることによって、任意の材料・配合において水和物の種類と量が把握され、水和物の集合体として硬化体の諸性質が推定されることになる。さらには、マトリックス部分に加えて骨材の性質を考慮することによりコンクリートの性能評価が可能となる。本研

究ではこのようなシステムを構築することを最終的な目的とし、その基礎的段階の検討を行ったものである。

## 3. 研究の方法

(1)水和モデルの構築：ポルトランドセメントを構成する各種クリンカーの水和モデルを構築した。特に、エーライトとビーライトの反応について詳細に検討し、クリンカー鉱物反応率と生成物の物質収支から C-S-H の C/S 比を算出した。

(2)水和物の諸性質の測定：対象とする水和物は、C-S-H、エトリンガイト、モノサルフェート、 $C_3AH_6$ 、 $C_4AH_13$ とした。また、対象とする性質は、密度、比表面積、ゼータ電位とした。特に、C-S-H については、組成の変化（C/S 比の変化）による各性質の変化に着目して検討した。

(3)水和物の性質とセメント硬化体の物質移動性の関係のモデル化：硬化体を水和物の集合体とする視点から、物質移動性を評価した。具体的には、水和物生成量と水和物密度から固相体積（あるいは空隙量）を、比表面積から物質移動経路を、ゼータ電位からイオン移動に及ぼす電気的な影響を評価した。

## 4. 研究成果

(1)セメントの主要鉱物であるエーライトの水和を詳細に検討し、水和生成物である C-S-H の C/S モル比および H/S モル比が材齢と伴に変化することを明らかにした（図 1）。

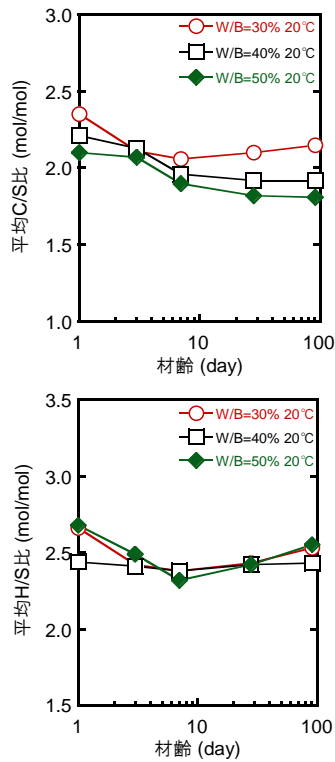


図1 C-S-HのC/S比およびH/S比の経時変化

(2) ビーライトの水和により生成する C-S-H について検討し、水和反応式を確定するとともに C/S 比と H/S 比の関係、C/S 比と比表面積の関係 (図 2) について検討し、それらが エーライトの場合と同じであることを明らかにした。

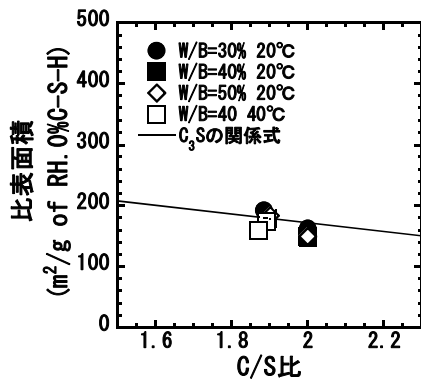


図2 ビーライトから生成したC-S-HのC/S比と比表面積の関係

(3) 合成 C-S-H および種々の材料・配合の水和試料を用いて C-S-H の組成および密度と比表面積を測定した。その結果、密度および比

表面積は材料・配合に依らず、C/S 比と比例関係にあることを明らかにした (図 3, 図 4)。

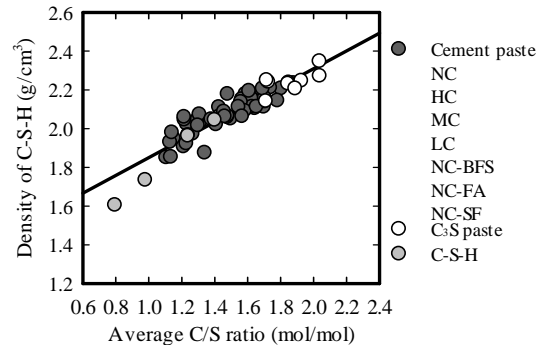


図3 C-S-HのC/S比と密度の関係

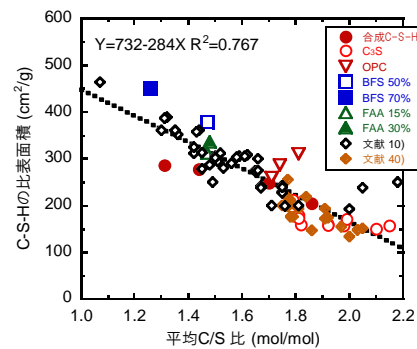


図4 C-S-HのC/S比と比表面積の関係

(4) アルミネート相の水和生成物について検討し、カルシウムアルミネート系水和物の比表面積の推定手法を構築した。

(5) 個々の水和物の比表面積を積算して、セメント系硬化体全体の比表面積を推定できることを明らかにした (図 5)。

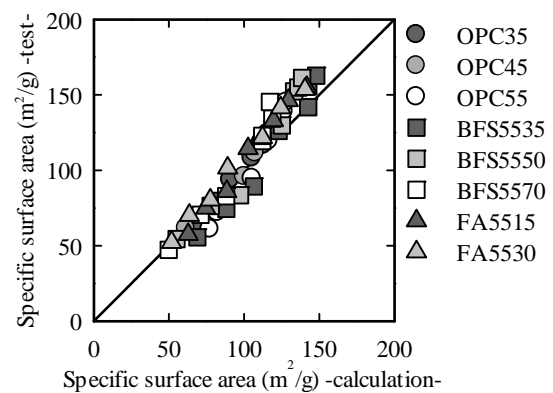


図5 セメント硬化体の比表面積の推定結果

(6) C-S-HのC/S比がゼータ電位に及ぼす影響について検討した(図6)。さらに、個々の水和物のゼータ電位を積算することにより、硬化体のゼータ電位をある程度評価できることを確かめた。

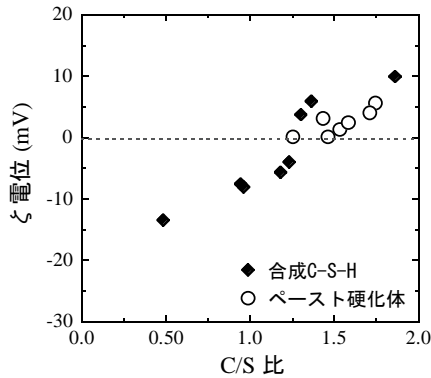


図6 C-S-HのC/S比とゼータ電位の関係

(7) 酸素の拡散係数により空隙特性である屈曲度を求め、C/S比によるC-S-Hの物理的性質が屈曲度に及ぼす影響について検討した。その結果、空隙構造の変化をC/S比ごとのC-S-H比表面積の違いにより説明することが可能であることを示した(図7)。

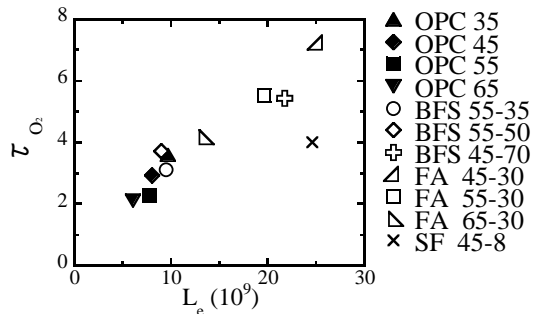


図7 C-S-Hの比表面積の関数Leと酸素拡散屈曲度の関係

(8) 塩化物イオン実効拡散係数から求めた屈曲度と酸素拡散における屈曲度の比較を行った結果、細孔直径6nm以下の空隙量が多いほど、塩化物イオン拡散における屈曲度と酸素拡散における屈曲度の比、即ち塩化物イ

オン拡散経路の延長度が増大する傾向を示すことを明らかにした。

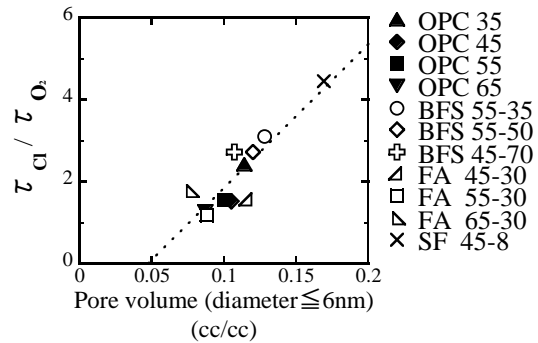


図8 直径6nm以下の空隙量と塩化物イオンおよび酸素拡散屈曲度の比の関係

(9) 水和物に基づく酸素拡散係数推定手法の適用性について検討を行い、セメント-高炉スラグ-シリカフェームの三成分系結合材、蒸気養生を行った硬化体においても、これまで開発した水和物に基づく物質移動性評価手法により酸素拡散係数の推定が可能であることを確かめた(図9)。

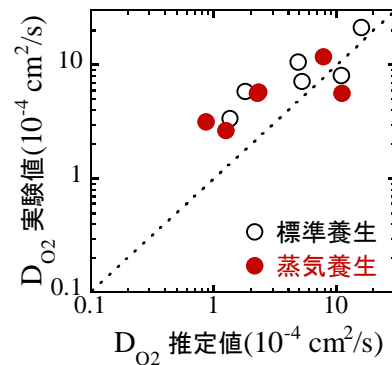


図9 酸素拡散係数の推定結果

## 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11件)

①須田 裕哉, 土田 詩織, 佐伯 竜彦:セメント系硬化体の水和物の比表面積に関する研究, セメント・コンクリート論文集, 査読有, No. 65, pp. 103 - 110, 2011.

② M. KIKUCHI, Y. SUDA and T. SAEKI: Evaluation for Ion Transport in Hardened Cementitious Paste by Oxygen Diffusion and Chloride Diffusion, Proc. of The 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, 査読無, pp. 4805-4812, 2011.

③ Y. SUDA and T. SAEKI: Relation between Chemical Composition and Physical Properties of C-S-H, Proc. of The 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, pp. 4833-4840, 査読無, 2011.

④ 田裕哉, 田中洋介, 佐伯竜彦: C-S-H の組成と物理的性質に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 査読有, Vol. 66, No. 4, pp. 528-544, 2010.

⑤ 地道生, 須田裕哉, 佐伯竜彦: 酸素および塩化物イオンの実効拡散係数によるセメント系硬化体におけるイオン移動性状の評価, セメント・コンクリート論文集, 査読有, No. 64, pp. 346-353, 2010.

⑥ 佐伯竜彦, 菊地道生: 水和物の性質がセメント系硬化体中の物質移動性に及ぼす影響に関する研究, セメント・コンクリート, 査読無, No. 764, pp. 52-55, 2010.

⑦ 須田裕哉, 佐伯竜彦, 佐々木謙二: エーライトが生成する C-S-H の組成に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 31, No. 1, pp. 43~48, 2009.

⑧ Sasaki, K. and Saeki, T.: Estimation of Chloride Transport in Cementitious Materials Based on Characteristics of hydration Products, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> RILEM Workshop on Concrete Durability and Service Life Planning, 査読有, pp. 262-269, 2009.

⑨ Saeki, T. and Sasaki, K.: Hydration Model for Cementitious Materials Containing

Mineral Admixtures, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> RILEM Workshop on Concrete Durability and Service Life Planning, 査読有, pp. 466-473, 2009.

⑩ 田中洋介, 佐伯竜彦, 佐々木謙二, 須田裕哉: C-S-H の密度に関する基礎的検討, セメント・コンクリート論文集, 査読有, No. 63, pp. 70-76, 2009.

⑪ 菊地道生, 佐々木謙二, 須田裕哉, 佐伯竜彦: C-S-H の組成が塩化物イオン拡散性状に及ぼす影響に関する基礎的検討, セメント・コンクリート論文集, 査読有, No. 63, 354-361, 2009.

[その他]

第 39 回セメント協会論文賞受賞  
菊地道生, 須田裕哉, 佐伯竜彦: 酸素および塩化物イオンの実効拡散係数によるセメント系硬化体におけるイオン移動性状の評価, セメント・コンクリート論文集, No. 64, pp. 346-353, 2010.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐伯 竜彦 (SAEKI TATSUHIKO)  
新潟大学・自然科学系・准教授  
研究者番号: 90215575