論文　フライアッシュコンクリートの空隙形成と水分移動・平衡の連成解析に基づく収縮特性評価

半井　健一郎[*1]・石田　哲也[*2]

要旨：フライアッシュの混合により，自己収縮および乾燥収縮挙動が影響を受ける。本研究では，収縮および水分逸散挙動を，水和・空隙構造・水分の連関を考慮した連成解析を用いて検討し，実験結果との比較を行うことで，フライアッシュ混合若材齢コンクリートの固体形成過程の分析を行った。常温下でのフライアッシュの緩慢な反応により，結合水量の減少と粗大な空隙構造がもたらされ，自己収縮および乾燥収縮がともに低減されることを示した。

キーワード：自己収縮，乾燥収縮，フライアッシュ，水和，空隙構造，水分逸散

1. はじめに

コンクリート混和材としてのフライアッシュ（以下FA とする）の利用は，水和発熱の低減，自己収縮の低減，ポゾラン反応による空隙構造の緻密化等の性能向上に効果がある。最近は，放射性廃棄物処分施設における人工バリアとしてのコンクリートにおいても，FA の使用が検討されている。建設時の発熱抑制や長期供用期間中のカルシウム溶脱の抑制，共に使用するベントナイトへの影響軽減等を期待したものである。また，産業副産物の有効利用としても重要である。火力発電所からの石炭灰発生量は増加し，特にセメント分野での利用量が増加している。また，海外炭の使用量が増加することで，品質のバラツキの拡大も指摘されており，物理・化学特性の影響を評価することも必要になっている。

以上のことから，FA の性能評価および FA 特有の現象に関する機構解明が求められる。筆者らの研究グループでは、任意の配合と環境条件に対して，若材齢コンクリートの形成過程および供用期間中に進行する劣化現象を，時空間でシミュレーションする解析システムの開発を進めている [1)]。複合水和発熱モデル，空隙構造形成モデル，水分保持移動モデルを基本とし，相互連関を考慮した計算を行うことで，時系列と空間軸でセメント硬化体の特性が追跡される。FA に関しても開発初期段階より考慮されてきたが，最近の研究により，水和発熱挙動 [2)]および空隙構造形成 [3)]等への混和材の影響に関して，モデルの高度化が達成されている。これにより数値解析手法による FA コンクリートの性能予測に関して，より詳細な議論ができる環境が整いつつあるといえる。

本研究では，自己収縮および乾燥収縮，水分逸散挙動を取り上げ，FA を混合した若材齢コンクリートの固体形成過程を，水和－空隙構造－水分の連関を考慮した数値解析手法により，俯瞰的に考察するものである。なお，FA の品質のバラツキに関しては，水和発熱モデルにおける化学組成によるセメントの評価と同様に考慮が可能と考えられるが，今後の課題とし，本研究では検討の対象外とする。

2. 熱力学連成解析システム

2.1 フライアッシュ混合コンクリートに関するモデルの高度化

(1) 複合水和発熱モデルの高度化 [2)]

複合水和発熱モデル [4)]は，セメント中の反応をクリンカー鉱物ごとに記述するとともに，高炉スラグ微粉末および FA についてもモデル化を行い，種々のポルトランドセメントおよび混合セメントにおける水和発熱挙動の追跡が可能である。各鉱物反応の発熱速度は基準発熱速度と温度活性の 2 つの材料関数

*1 東京大学　大学院工学系研究科社会基盤学専攻助手　博士(工学)（正会員）
*2 東京大学　大学院工学系研究科社会基盤学専攻助教授　博士(工学)（正会員）

により表現され，クリンカー鉱物および混和材間の相互依存性は要因ごとに考慮されている。ポルトランドセメントにより生成される水酸化カルシウム量に依存する混和材反応速度の評価が行われている。

最近の研究において，FA の反応率の計測結果が報告されるようになったことから，従来モデル [4]のより詳細な検証が可能となった。検討の結果，当初仮定した以上に，FA の常温環境下での反応が緩慢であること，また，反応速度の温度依存性が大きいことが明らかになった。20℃環境下における非常に緩慢なFAの反応を再現するために，基準水和発熱速度がさらに小さく，高温下での反応の大幅な活性化を再現するために，温度活性の値が小さく修正された。これらの修正により，常温環境全般および高置換率高温環境下における FA 反応の解析精度が向上した。

(2) 空隙構造形成モデルの高度化 [3]

空隙構造形成モデルでは，水和の進行あるいはカルシウム溶脱による空隙構造の変化を，水和生成物の体積や材料特性から計算している。FA を混合することで，十分に反応が進んだ段階では空隙構造が緻密化する。この緻密化は，水酸化カルシウムと C-S-H ゲルの割合の変化に起因する水和生成物の保有空隙率の増加によって説明できる [3]。FA のポゾラン反応によって水酸化カルシウムが消費され，複雑な層状構造の中に多くの空隙を含んだ C-S-H ゲルが生成されることで，全水和生成物に対する平均的な微細空隙量が増加するのである。

2.2 収縮挙動の予測モデル

コンクリートの乾燥収縮および自己収縮を引き起こす駆動力として，空隙内の相対湿度の低下による間隙水の毛細管張力を仮定した収縮予測モデルを提案している [5]。これまでに，各種ポルトランドセメントを使用したモルタルおよびコンクリートの収縮挙動を良好に追跡できることが確認されている。本研究における FA コンクリートの収縮挙動の検討では，水和－空隙構造－水分の連関を考慮した本手法を適用することする。なお，より詳細な解析手法として，細孔内水分の熱力学状態量と巨視的な力学挙動を直結させた時間依存構成則の構築も進めている [6]。細孔組織内に存在する水分子とセメント硬化体結晶の相互作用を考慮することで，自己・乾燥収縮のみならずクリープ挙動を含めた固体変形が，統一的な手法で予測可能となりつつある。

ここでの収縮計算 [5]では，まず，収縮を引き起こす駆動力となる毛細管張力に起因する応力σ_s を，Kelvin 式および Laplace 式により求める。そして，等方性を仮定した応力－ひずみ関係により，自由収縮ひずみε_{sh} を計算する。ここで必要となる変形係数 E_s は，持続的な張力作用下における体積変化の時間依存性等を考慮し，割線弾性係数 E_c の 1/4 としている。割線弾性係数は，経験式により圧縮強度から求めることとしている。

$$E_c = 8.50 \times 10^3 f_c'^{1/3} \tag{1}$$

ここで，f_c'：圧縮強度[MPa]である。同一強度のコンクリートの弾性係数は，FA を混合することで，ほとんど変化しないとする報告 [7]と若干増加するとの報告 [8]がある。本研究では，第一次近似として，FA コンクリートに関しても同一の式を用いることとした。

コンクリートの圧縮強度の予測には，セメント水比法則をはじめとして数多くの手法があるが，本論文においては，次式に示すように空隙率理論を補正して採用することとした。これは解析システムにおいて計算を行う空隙率分布の結果を簡易に反映させられることとともに，FA を混合したモルタルおよびコンクリートについても，強度と空隙率との相関が確認されていること [9]による。

$$f_c' = \alpha_\delta \cdot \left\{ A \exp\left(-B \cdot V_{pore} \right) \right\} \tag{2}$$

$$\alpha_\delta = \left(\frac{\delta_m}{\delta_{\max}} \right)^{1/2} \tag{3}$$

ここで，V_{pore}：セメント硬化体単位体積あたりの 50nm 以上の細孔容積，A,B：定数であり，A=80.0，B=4.0 とした。既往の実験結果に関して，解析により求まる細孔容積と実験で得られた圧縮強度の関係から，特に後述する乾燥収縮試験 [10]との整合性が良好になるよう，既往の研究の値を微修正した。α_δ：水和生成層厚に関する補正係数であり，若材齢時の水和

生成物が骨格形成する過程を考慮した。δ_{max}:粉体粒子の水和開始前の平均間隔[m]，δ_m:外部水和物生成層の平均厚さ[m]である [1)]。**図-1**に，成田らの研究 [10)]における圧縮強度の解析を示す。配合を**表-1**に示す。なお，本解析システムにおける詳細な強度および弾性係数の予測については，骨材剛性や水和度あるいはゲルスペース比理論などを用いた検討 [2),6)]を進めており，今後，より精度の高い予測手法を採用する予定である。

3. フライアッシュが収縮挙動に与える影響

3.1 自己収縮

FA を混合することにより，自己収縮が低減することが指摘されている。ここでは，モルタルの自己収縮を検討した既往の実験結果 [11),12)]をもとに，固体形成過程の検討を行う。供試体は，直径 50mm，高さ 100mm の円柱で，打設後にシールを行い，水分逸散を防止している。20℃一定温度環境下で，埋め込み式のひずみゲージにより打設直後からの収縮量を計測している。凝結開始前の収縮量が含まれるため，本論文で対象とする毛細管張力に起因する自己収縮とは結果が異なり，大きな値になると考えられる。よって，ここでは定性的な傾向の議論に限定する。内部相対湿度の変化は，セラミックセンサの電気抵抗の測定値を変換して求めている。配合を**表-2**に示す。実験結果は，FA の置換率が高くなるほど，自己収縮ひずみが減少すること(**図-2**)，弾性係数が小さくなること(**図-4**)，内部相対湿度の低下が減少すること(**図-5**)を示している。

解析により計算された自己収縮ひずみの変化を**図-3**に，弾性係数を**図-4**に，内部相対湿度を**図-6**に示す。FA の置換率が高くなるほど，自己収縮ひずみ，弾性係数，内部相対湿度低下が減少しており，定性的には，実験結果の傾向と整合していることが分かる。FA の反応は常温環境下では非常に緩慢なため [2)]，置換率が高いほど，平均的な水和度の進行速度が低下する(**図-7**)。ここで平均水和度は，鉱物ごとに積算発熱量を最大積算発熱量で除して計算される各水和度を，鉱物比率をもとに平均化処理をした値である。FA 混合による平均水和度の低下により，水分の消費や水和物の生成が抑制され，弾性係数の低下と自己乾燥の低減を同時にもたらす。弾性係数低下が収縮ひずみを増加させる一方で，自己乾燥低減は毛細管張力を減少させ，収縮ひずみを低減させる。相反する両者のバランスの結果，毛細管張力減少による収縮ひずみ低減効果がより支配的になったのである。微視的機構を考慮した総合的な連成解析により，FA 置換率が高くなるほど顕著になる FA コンクリートのマクロな自己収縮低減効果が，定性的には良好に追跡できた。ただし，定量的には，実験結果と解析結果には差異があり，今後より詳細な検討が必要である。

表-1　コンクリートの配合 [10)]

No.	W/P (%)	単位量 (kg/m^3)				
		W	C	FA	S	G
OPC	30.9	175	567	0	745	806
FA30	30.4	165	379	163		
FA50	30.2	159	263	263		
FA70	31.0	156	151	352		

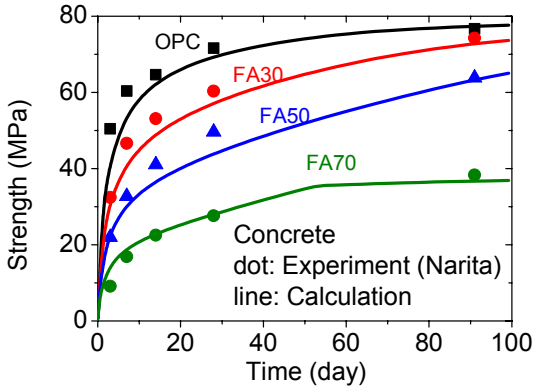

図-1　圧縮強度の変化(実験および解析値)

表-2　モルタルの配合 [11),12)]

No.	W/P (%)	単位量 (kg/m^3)			
		W	C	FA	S
OPC	30.0	258	860	0	1273
FA10	30.9		774	60	
FA30	33.0		602	180	
FA60	36.6		344	361	

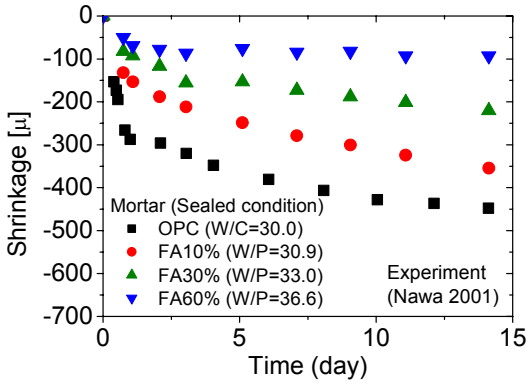

図-2　自己収縮ひずみの変化（実験値 [11]）

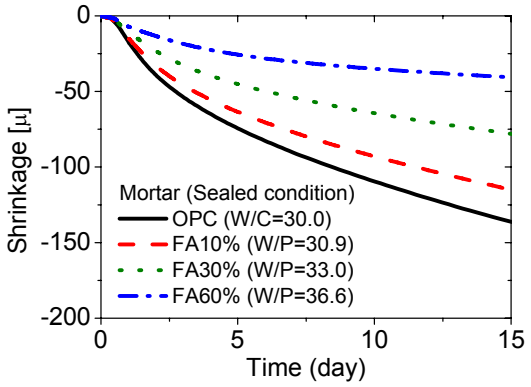

図-3　自己収縮ひずみの変化（解析値）

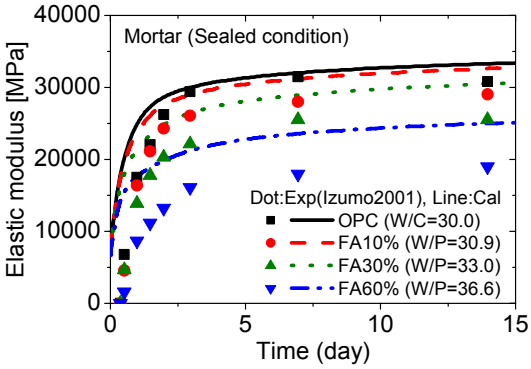

図-4　弾性係数の変化（実験値 [12]，解析値）

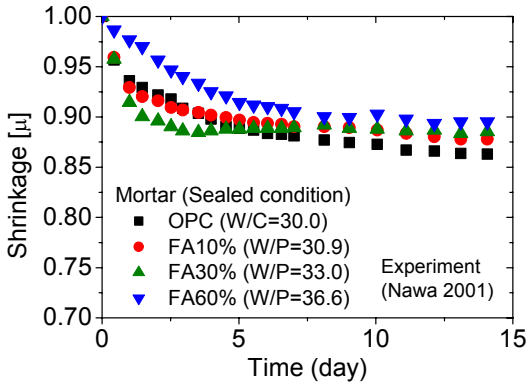

図-5　内部相対湿度の変化（実験値 [11]）

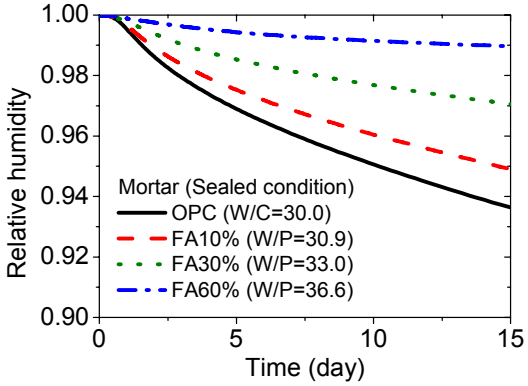

図-6　内部相対湿度の変化（解析値）

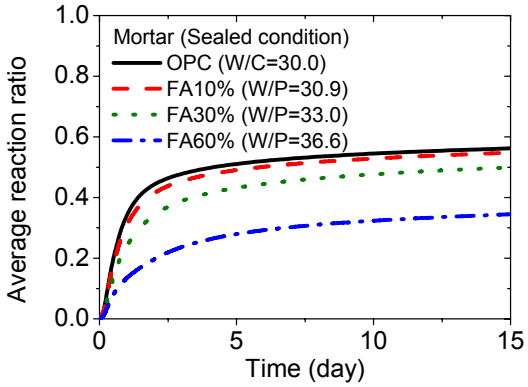

図-7　平均水和度の変化（解析値）

3.2 乾燥収縮

乾燥収縮に関しても，FA を混合することによって低減されることが報告されている。ここでは，コンクリートの水分逸散および乾燥収縮現象に関して，既往の実験結果 [10]との比較検討を行う。加えて，FA コンクリートの初期固体形成過程に関する感度解析を多角的に行うことで，質量変化および収縮として現れるマクロな物性が，いかなる機構の組み合わせによって現れるかについて解析的に検討を行う。

乾燥収縮試験 [10]は JIS A1129 により行われ，10×10×40cm の角柱供試体を水中で 7 日間養生した後に，温度 20℃湿度 60%の環境下で，収縮ひずみおよび質量減少率が測定された。材齢 28 日における空隙径分布も計測されている。実験結果は，FA 置換率が高くなるほど，収縮減少率が大きくなるものの，乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向を示した(**図-8，9**)。配合を**表-1**に示す。

解析による収縮ひずみの計算結果を**図-8**に，質量減少率を**図-9**に示す。解析値は，実験において

示された FA 混合効果と概ね整合する結果となった。ただし，質量減少率については，やや過大な減少の後に若干増加に転じており，実験との差異もみとめられる。解析における質量増加は，乾燥環境により水分が逸散したことに加えて，自己乾燥のために内部相対湿度が低下し，環境中の気中水蒸気を吸収したためである。これらの実験結果との乖離については，今後より詳細な検討を行う必要がある。

ただし，FA コンクリートの水分逸散および乾燥収縮挙動の傾向については，数値解析により概ね予測ができていると判断されることから，FA の乾燥収縮への影響に関して考察を行う。**図-10** に，質量減少率と乾燥収縮量の関係を示す。FA を混合することにより，逸散水量が増加するにもかかわらず乾燥収縮量が増大しないことがわかる。**図-11** には，材齢 28 日における空隙径分布を示す。乾燥の影響により，位置により形成される空隙構造は異なるため，ここでは平均値を示している。FA の置換率が高いほど，空隙量が多くなると共に粗大な空隙が残存していることが計算されており，実験結果とも整合している。相対湿度 60%のもとで，熱力学理論から求まる液状水が存在する最大空隙半径 r_{s_RH60} の寸法は，4.5×10^{-9}m である。計算された空隙径分布は，空隙半径 r_{s_RH60} 以上の空隙率が，FA 置換率が高いほど大きく増大することを示しており，この粗大空隙の増加により水分逸散量が増加し，質量減少率が大きくなったことが分かる。一方で，空隙半径 r_{s_RH60} 以下の空隙に存在して毛細管張力を作用させる液状水の量は，FA 置換率が高いほど若干減少している。同一の相対湿度 60%のもとで発生する毛細管張力

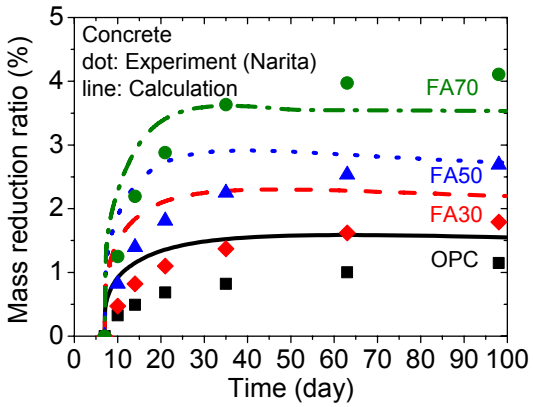

図-8 質量減少率の変化（実験・解析値）

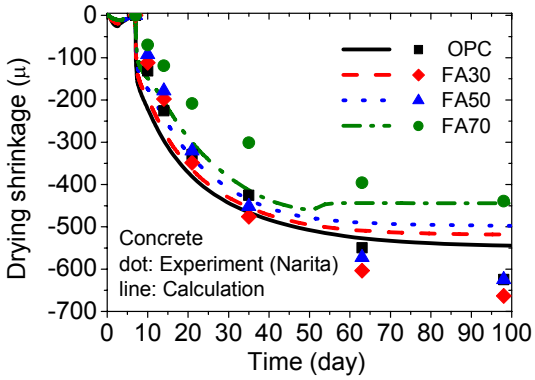

図-9 乾燥収縮ひずみの変化（実験・解析値）

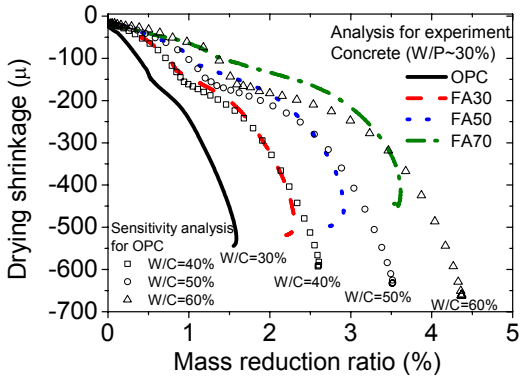

図-10 質量減少率と乾燥収縮量の関係（解析値）

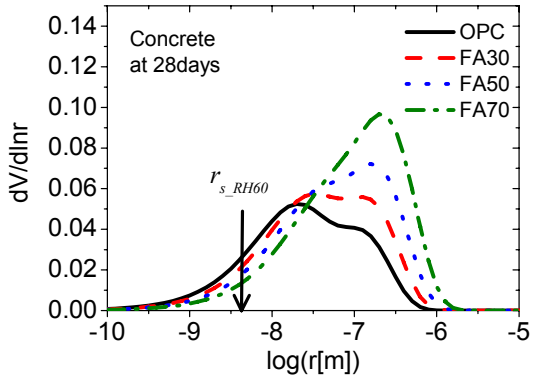

図-11 空隙径分布（材齢 28 日，解析値）

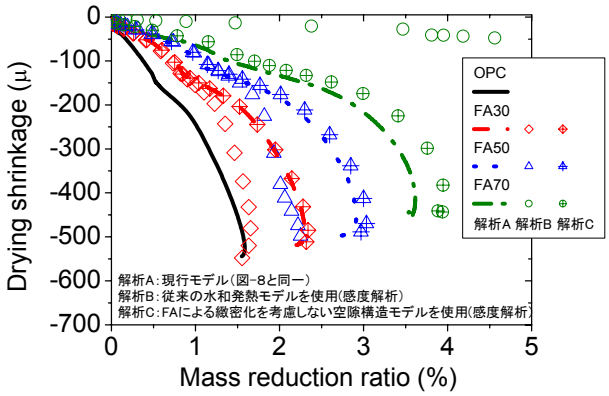

図-12 質量減少率と乾燥収縮量の関係（感度解析）

は同一のため，収縮の駆動力となる応力は，FA 置換率が高いものほど毛細管張力の作用面積に応じて若干低下することになる。同時に，FA の混合によって，強度の低下（**図-1**）と共に弾性係数も低下するため，結果として，乾燥収縮量はほとんど同じか，若干小さな値になったのである。

水和および空隙構造形成の影響に関して確認するため，従来の水和発熱モデル[1)]および FA 混合による緻密化を考慮しない空隙構造形成モデルを使用した場合の感度解析を行った（**図-12**）。今回の検討範囲では，水和モデルの予測精度向上[2)]が，収縮挙動の予測精度向上に大きく貢献していることが分かる。従来水和モデルでは，置換率 30，50%では FA の反応が早く進むために無置換のものとの差が縮まる一方，置換率 70%では初期の反応停滞を過大評価したために水分逸散が極めて大きくなる。FA の反応による空隙構造の緻密化は，常温環境では FA の反応速度が遅いために影響は大きくない。

最後に，感度解析として，水セメント比 40，50，60％の普通コンクリートに関して同じ環境条件での解析を行い，得られた質量減少率と乾燥収縮量の関係を**図-10** に加えた。水セメント比が高くなるほど，水分逸散が大きくなるものの乾燥収縮量はそれほど大きくならなかった。これは，FA 置換の場合と同様に，水セメント比の増加によって空隙構造が粗大化したためである。

4. 結論

フライアッシュコンクリートの収縮挙動について，微視的機構から解析手法による検討を行った。常温環境下でのフライアッシュの緩慢な反応の進行により，結合水量が減少することで自己収縮量は低下すること，乾燥環境下では，粗大な空隙構造のために，水分逸散量が増大するものの乾燥収縮量は大きくはならないことが明らかになった。

参考文献

1) Maekawa, K., *et al*.: Multi-scale modeling of concrete performance -Integrated material and structural mechanics, Journal of Advanced Concrete Technology, 1 (2) pp.91-126, 2003.
2) 小田部裕一：複合水和発熱モデルの一般化と水和組織形成に着目した強度発現モデルの開発，東京大学博士論文，2005.
3) 半井健一郎ほか：セメント硬化体空隙組織の形成および劣化との連成によるカルシウム溶出解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.715-720，2005.
4) 岸利治，前川宏一：高炉スラグおよびフライアッシュを用いた混合セメントの複合水和発熱モデル，土木学会論文集，No.550/V-33，pp.131-143，1996.
5) 石田哲也ほか：微視的機構に基づくコンクリートの自己収縮，乾燥収縮及びその複合に関する解析的検討，土木学会論文集，No.578/V-37，pp.111-121，1997.
6) 朱銀邦ほか：細孔内水分の熱力学的状態量に基づくコンクリートの複合構成モデル，土木学会論文集，No.760/V-63，pp.241-260，2004.
7) 浮田和明ほか：分級フライアッシュを混入したコンクリートの基礎物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.10，No.2，pp.1-6，1988.
8) 伊藤智章ほか：フライアッシュを細骨材の一部に用いたコンクリートの強度および耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.217-222，2000.
9) 内川浩ほか：混合セメントモルタル及びコンクリートの硬化体構造が強度発現性状に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.330-335，1990.
10) 成田健ほか：フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.925-930，2001.
11) 名和豊春ほか：モルタル硬化体中の湿度変化と自己収縮の関係，セメント・コンクリート論文集，No.55，pp.218-225，2001.
12) 出雲健司ほか：フライアッシュを使用した若材齢時のモルタルの自己収縮と力学性能について，セメント・コンクリート論文集，No.55，pp.176-181，2001.