論文　モルタルの自己収縮に及ぼす内部相対湿度および力学的性質の影響

名和　豊春[*1]・堀田　智明[*2]・出雲　健司[*3]

要旨：本研究では，4 種類のフライアッシュを混入したモルタルの自己収縮と内部相対湿度および力学的性質との関係から，自己収縮のメカニズムについて考察を行った。その結果，モルタルの自己収縮および内部相対湿度はフライアッシュの品質の影響を大きく受け，フライアッシュの種類により，生成した水和物が形成する細孔構造が変化することが示唆された。また，内部相対湿度から求められる毛細管張力とモルタルのヤング係数から算定される弾性ひずみと実測した自己収縮ひずみの比較から，フライアッシュが自己収縮を低減する効果に未水和フライアッシュによる収縮抑制も関与していることが推論された。

キーワード：自己収縮，フライアッシュ，内部相対湿度，力学的性質，毛細管張力

1．はじめに

コンクリート構造物の早期劣化が社会的問題となり，高耐久な構造物が求められる中で，高流動・高強度コンクリートなどの高性能コンクリートが一般建築物にも広く使用されてきている。しかし，これらの高性能コンクリートでは，水結合材比が小さく単位結合材量が多いことから従来では大きな問題とならなかった自己収縮が顕在化し，ひび割れが発生する危険性が指摘されている[1)]。ひび割れは直接的には構造物の耐久性にあまり関連しないが，ひび割れを通して劣化要因が浸入するため，多くの複合劣化の誘因となることが指摘されており，構造体に与える影響も大きいと考えられる。

コンクリートの自己収縮については，混和材の影響について多くの研究報告がなされており，フライアッシュが自己収縮を低減させる傾向があるものと考えられている[1)]。著者らも，フライアッシュによる自己収縮の低減効果について一連の研究を行ってきており，フライアッシュを混和した場合は内部相対湿度が低下しても自己収縮が進展しないことを見出した[2)]。他方，品質の異なるフライアッシュを混和したモルタルの自己収縮低減について調べ，自己収縮を低減させないフライアッシュも存在することを明らかにした[3)]。したがって，フライアッシュの自己収縮低減メカニズムに関しては未だ不明な点も多く，混和材を積極的に活用した自己収縮の制御方法が確立されていないのが現状である。

コンクリートの乾燥による収縮の発生メカニズムに関しては，毛細管張力理論，表面吸着理論，層間水理論，分離圧説（浸透圧説）等多くの理論が提案されている[4)]。しかし，未だに統一された見解が得られていない。したがって，自己収縮の発生メカニズムを明らかにするためには，上記の分離圧や毛細管張力などによる収縮メカニズムの要因である内部相対湿度やヤング係数を測定し，自己収縮の挙動と対比して検討する必要があるものと考えられる。

本研究は，このような背景に基づき，品質の異なる 4 種類の海外炭フライアッシュを混入したモルタルの自己収縮，内部相対湿度および力学的性質を測定し，自己収縮のメカニズムについて考察を行ったものである。

＊1　北海道大学大学院　助教授　工学研究科社会基盤工学専攻　工博　（正会員）
＊2　北海道電力株式会社　土木部建築センター　（正会員）
＊3　北海道大学大学院　助手　工学研究科社会基盤工学専攻　工博　（正会員）

表－1　フライアッシュの物理化学的性質

記号	強熱減量 (%)	密度 (g/cm^3)	ブレーン値 (cm^2/g)	45μmフルイ残分 (%)	フロー値比 (%)	活性度指数(%) 28日	活性度指数(%) 91日	SiO_2 (%)	CaO (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	pH
UL/BA	2.1	2.14	2960	13	101	83	95	68.4	0.27	21.6	4.03	4.3
UL	2.3	2.12	2900	16	100	85	99	69.3	0.42	19.2	4.88	4.0
MT1	1.8	2.21	2660	20	108	85	－	56.2	5.25	21.9	5.28	12.3
MT3	2.5	2.31	3930	14	111	79	－	55.3	5.03	22.2	5.61	12.0

表－2　モルタルの調合

混和材容積置換率 (%)	水粉体容積比 w/b	細骨材混入率 V_s/V_m	単位量 (kg/m^3) 水 W	セメント C	フライアッシュ FA	細骨材 S
0	0.948	0.47	258	272	0	470
30				190	82	

2．実験計画

2．1　使用材料および調合

セメントには，普通ポルトランドセメント（OPC）を，混和材は海外炭フライアッシュ４種類（UL/BA，UL，MT1，MT3）を用いた。各フライアッシュの特性を**表－1** に示す。フライアッシュの記号のうち，英文字は炭種を表し，数字は採取した電気集塵機のどの段で採取したかを示す。細骨材には浜厚真産の陸砂（密度：2.71g/cm³，吸水率：2.1%，F.M：2.71）を，混和剤にはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を用いた。**表－2** にモルタルの調合を示す。モルタルの練り混ぜにはホバート型ミキサ（公称容量約 5l）を用い，粉体と骨材を投入し 60 秒空練りし，水と混和剤を投入し 90 秒低速で練り混ぜ，掻き落としをした後更に高速で 90 秒練り混ぜた。なお，練上がり温度は 20±2℃とした。

2．2　試験項目および試験方法

（1）自己収縮ひずみ

自己収縮ひずみの測定は，著者ら[5)]の提案する低弾性型埋め込みゲージ（ヤング係数 1.2N/mm²）を用いて行なった。供試体は 5φ×10cm の鋼製型枠を用いて作製し，型枠に試料を投入すると同時に，供試体中央にひずみゲージを埋設した。試料が長さ変化を起こす際に，型枠と試料との間に生じる摩擦を低減する目的で型枠の内側に厚さ 0.1mm のテフロンシートを敷いた。試料の打ち込み後は，水分の逸散を防ぐため上端面を封緘し，室温 20℃，相対湿度 60%の恒温室で脱型せずに養生し，混練直後から 2 週間までのひずみを測定した。なお，自己収縮ひずみの測定値は 3 本の供試体の平均値とした。

（2）力学的性質

JIS A 1108 に準拠し，φ5×10cm の供試体を用いて，材齢 0.5，１，2，3，7 日で圧縮試験を行い，圧縮強度とヤング係数の測定を行った。供試体は，打設直後に封緘し，20℃一定に保たれている恒温恒湿槽中にて所定の材齢まで養生し，試験に供した。

（3）結合水率

モルタルの調合と水/粉体比が等しいセメントペーストにより結合水率を測定した。セメントペーストは，材料を一括投入した後ハンドミキサにより 3 分間練り混ぜて作製し，所定の材齢に達した時点で粉砕した後，大量のアセトン中に 1 日間浸漬して水和を停止させ，40℃で 4 時間乾燥後，再度粉砕し結合水量を求めた。結合水量は 1000℃での強熱減量から求め，未水和のセメントの強熱減量を補正して，未水和の粉体（セメント＋フライアッシュ）に対する容積比率（以後，結合水率）で示した。なお，結合水率の測定は，材齢 0.5，1，2 日で行った。

（4）内部相対湿度

相対湿度の測定は，湯浅ら[6)]が提案したセラミックセンサを用いて行った。相対湿度は，著者らが既報[2)]に示した次式を用いて，セラミッ

クセンサの電気気抵抗より求めた。供試体には，φ5×10cm 鋼製型枠で作製し，セラミックセンサは試料中央部に埋設した。試料打ち込み後は水分の逸散を防ぐため上部端面を封緘し，供試体作製直後から材齢 7 日までの相対湿度の変化を測定した。

$$RH = -0.055(\rho - 372.8)^{0.47} + 100 \qquad (1)$$

ここに，RH：相対湿度（%），ρ：セラミックセンサの電気抵抗（Ω）

3. 実験結果および考察

3.1 自己収縮

モルタルの自己収縮に及ぼすフライアッシュの影響を**図－1** に示す。図より，フライアッシュの自己収縮低減効果は，フライアッシュの炭種によって大きく異なっていることが分かる。

3.2 内部相対湿度

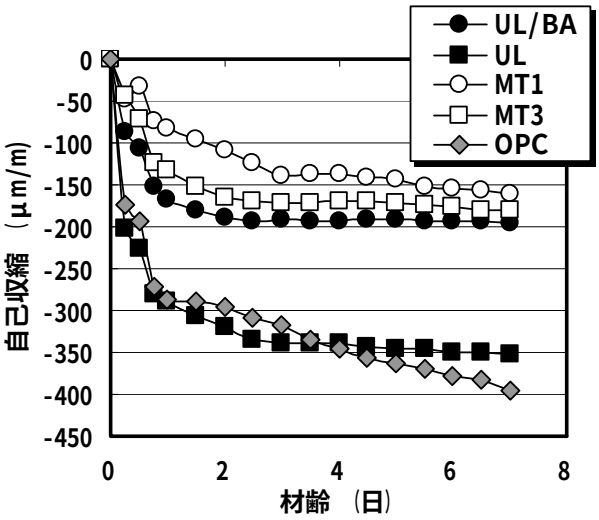
図－2 にモルタルの内部相対湿度の変化を示す。図より，フライアッシュの置換により材齢 1 日以降では相対湿度の低下が徐々に緩和してゆくのが認められる。しかし，材齢 2 日までの相対湿度の低下の度合は，フライアッシュの種類により差異があり，MT3 では内部乾燥がかなり進むのが認められた。他方，**図－3** に示すように結合水率はフライアッシュの種類によらずほぼ同程度であった。これより，フライアッシュの種類により，生成する CSH ゲルなどの水和物が形成する細孔構造は異なることが推論される。

3.3 圧縮強度およびヤング率

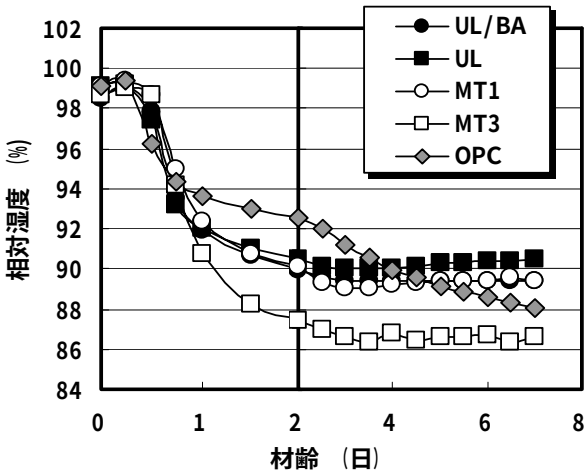
図－4 および**図－5** に，モルタルの圧縮強度とヤング率を示す。図より，フライアッシュ MT1 および MT3 では置換により圧縮強度が低下するが，他の 2 種類のフライアッシュでは強度低下が認められないことが分かる。これに対し，ヤング率はフライアッシュの種類に関わらず，ほぼ同じような比率で低下することが認められた。

3.4 自己収縮のメカニズムに関する考察

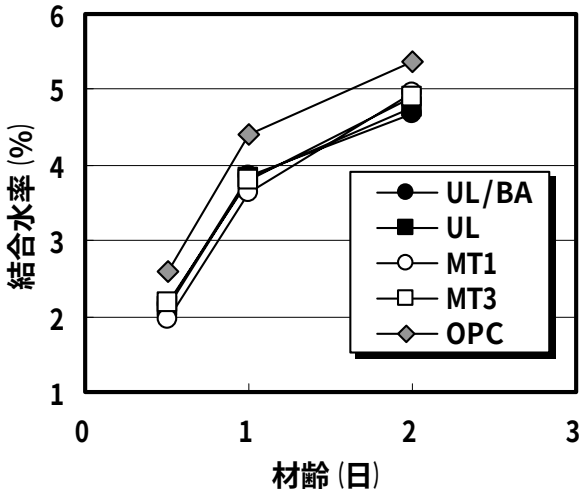
従来から乾燥収縮のメカニズムとして種々の説が提案されているが，相対湿度 40%以上での



図－1 モルタルの自己収縮に及ぼすフライアッシュの影響



図－2 モルタルの内部相対湿度の変化



図－3 フライアッシュペーストの結合水率の変化

駆動力としては毛細管張力と分離圧が考えられている[4)]。しかし，分離圧は吸着層厚さが 1.3nm まで作用するとされており[4)]，空隙中に形成されるメニスカスの曲率半径がこの値以下でなければ作用しない。Kelvin 式によれば，相対湿度が 80%の水蒸気圧と平衡であるメニスカスの曲率半径は 4.8nm であり，**図－2** の結果より，セメントおよびフライアッシュの水和反応による自己乾燥の範囲では，主に毛細管張力が作用しているものと推論される。

毛細管張力は，Laplace 式および Kelvin 式により式(2)のように表され，相対湿度が与えられれば，細孔半径とは無関係に定まることが分かる。

$$\Delta P = -\frac{RT\rho}{M}\ln\frac{P}{P_0} \qquad (2)$$

ここに，ΔP：毛細管張力（N/mm^2），P：蒸気圧，P_0：飽和蒸気圧，M：水の分子量（g/mol），R：気体定数（erg/°K・mol），T：温度（°K），ρ：水の密度（g/cm^3）

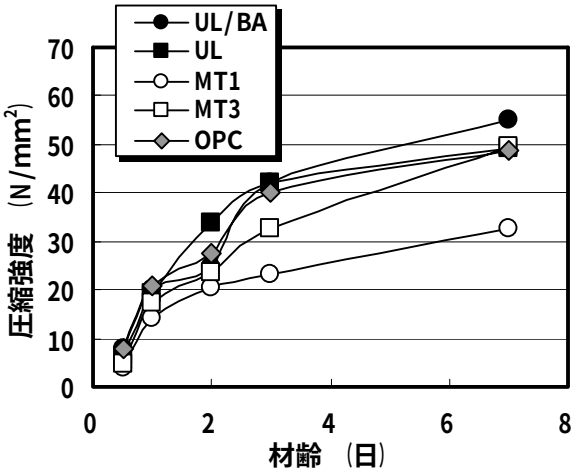
図－6 に相対湿度と自己収縮ひずみの関係を示す。各フライアッシュとも相対湿度の低下によって自己収縮ひずみが増大する傾向が認められた。しかし，その関係はフライアッシュの種類により異なった関係を示し，単に相対湿度の低下に及ぼすフライアッシュの影響から自己収縮挙動の相違を説明できないことが分かる。

図－7 に，相対湿度の測定結果から式（2）より算定した毛細管張力の経時変化を示す。図より，毛細管張力は材齢に伴い大きくなっており，フライアッシュの種類によって，発生する毛細管張力も大きく異なっていることが分かる。

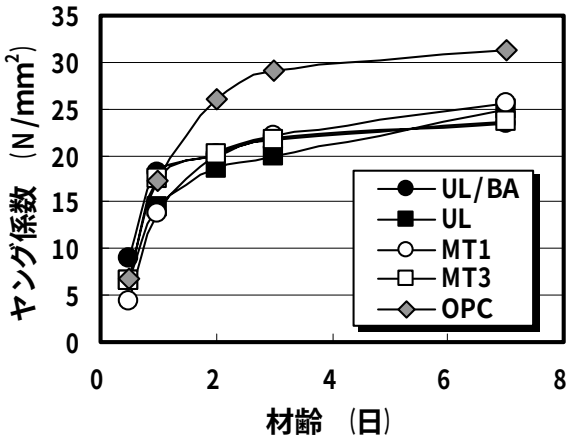
ここで，毛細管張力が硬化体中の液状水全体に均等に働いていると仮定した場合，瞬間的に生じる弾性ひずみは次式で示される。

$$\varepsilon = \Delta P \cdot \frac{e}{V} \cdot \frac{1}{E} \qquad (3)$$

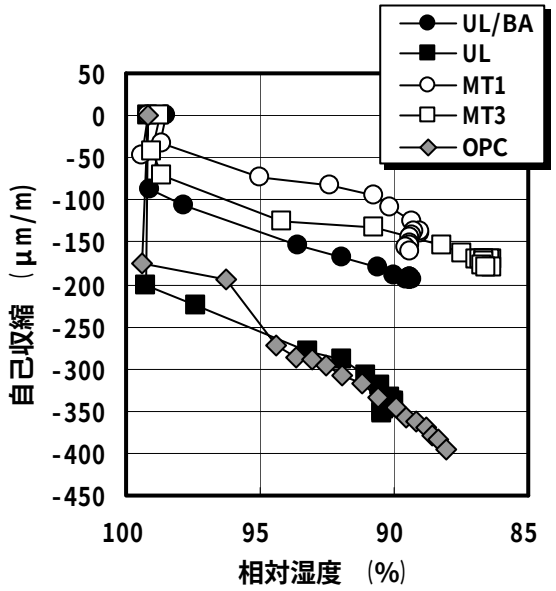
ここに，ε：自己収縮ひずみ，e：液状水の体積（m^3），V：硬化体の体積（m^3），E：硬化体のヤング係数



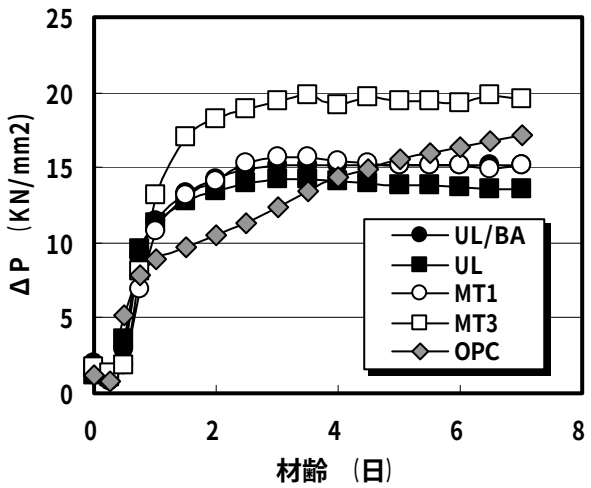
図－4　モルタルの強度発現



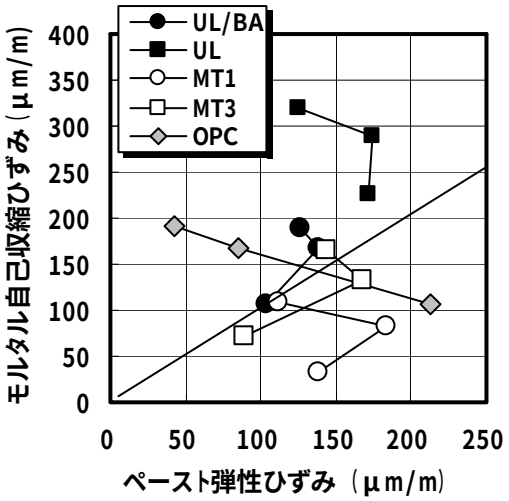
図－5　モルタルのヤング係数の変化



図－6　相対湿度と自己収縮ひずみの関係



図－7　毛細管張力に及ぼすフライアッシュの影響

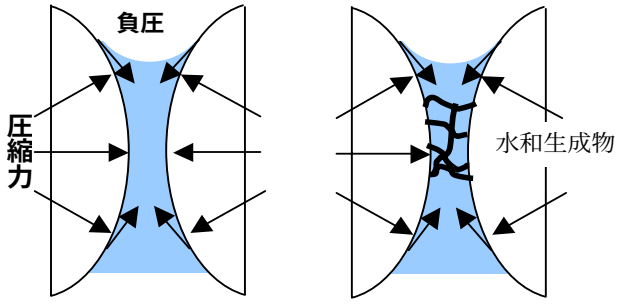


図－8　毛細管張力によるペーストの弾性ひずみとモルタルの自己収縮の関係

図－8 に，式（3）により算出した毛細管張力による材齢 0.5 日，1 日，2 日での弾性ひずみと自己収縮ひずみの実測値の関係を示す。硬化体のヤング係数にはモルタルのヤング係数の値を用いた。液状水の体積に関しては，硬化体中の自由水の内，水蒸気として存在する量は微少であることから，元の水量から結合水の実測値を差し引いて算定した自由水量とした。図中のペースト弾性ひずみは，毛細管張力がモルタル中のペースト部に作用すると仮定した時のペーストの弾性ひずみであり，**図－7** に示したように毛細管張力ΔP は材齢と共に増大するが，ヤング率も同時に増大するため，材齢と共に増大するわけではない。図より，ペーストの弾性ひずみとモルタルの自己収縮ひずみの関係はフライアッシュの種類によって大きく異なり，フライアッシュ MT1 を用いた場合，フライアッシュ UL や UL/BA を用いた場合よりも同じペーストの弾性ひずみに対する自己収縮が小さいことが認められる。この原因として，式(3)ではクリープの影響を考慮していないことが考えられる。

クリープは圧縮強度と高い相関があり，一般に圧縮強度が低いとクリープが大きいことが知られおり [7]，この事実に基づくならば材齢 2 日でのクリープ係数は，MT1≫MT3　OPC　UL/BA≧UL の順となり，普通セメントに比べクリープにより収縮が増大すると予想されるフライアッシュ MT1 の自己収縮の値が，普通セメントの自己収縮ひずみ量に近づくことが説明できる。しかし同時に，あまりクリープ係数が相違しないフライアッシュ UL を用いたモルタルで自己収縮が増大することを説明することが難しいことも分かる。

従来の収縮の作用機構に関する研究では，セメント硬化体中の毛細管は**図－9** に示すように貫通したように描かれており，毛細管張力による圧縮力がセメント粒子に作用するように表現されている例が多い。しかし，実際には毛細管の間隔が狭い部分にはセメント水和物の集合体による架橋構造が形成され粒子間に結合が生じていると考えられる。したがって，収縮により粒子間隔が狭まる場合には，セメント水和物が形成する架橋構造は圧縮力に対して抵抗し，収



図－9　自己収縮メカニズムの概念図

縮を抑制する因子となる。この時，セメント水和物の形成する架橋構造中に剛性の高い微粒子が共存すると，収縮がさらに抑制されることが当然予想される。一般に，剛性は密度が高いほど大きい傾向にあり，**図－8** に示す結果でも，密度の高いフライアッシュほど，同じペースト弾性ひずみに対応するモルタルの自己収縮ひずみが小さい傾向を示しており，上記の作業仮説と合致する。また，フライアッシュの混入量が増すと，相対湿度が低下しても自己収縮が余り増大しないという既報の実験結果[2)]も説明される。さらに，この作業仮説に基づくならば，水和反応率が長期材齢まで高くならない C_2S や C_4AF を多く含むセメントでは自己収縮が低減するのに対し，粒径が小さく初期にほとんど水和してしまうセメントでは自己収縮が増大すると推論され, C_2S や C_4AF を多く含む低熱セメントや中庸熱セメントで自己収縮が抑制され[8)]，粒径が 6 μm 以下にすると低熱セメントや中庸熱セメントでも大きな自己収縮ひずみを示す[9)]という既知の事実が良く説明される。以上より，自己収縮のメカニズムとしては，水和反応による自己乾燥に起因して発生する毛細管張力の他に，生成した水和物が形成する構造の有する収縮に対する抵抗力を考慮する必要があるものと判断される。

4．おわりに

本研究では, 4 種類のフライアッシュを混入したモルタルの自己収縮と内部相対湿度および力学的性質との関係から，自己収縮のメカニズムについて考察を行った。その結果，モルタルの自己収縮および相対湿度はフライアッシュの品質の影響を大きく受け，フライアッシュの炭種により，生成した水和物が形成する細孔構造が変化することが示唆された。また，相対湿度と平衡にあるメニスカスの曲率半径よりセメントおよびフライアッシュの水和反応による自己乾燥の範囲では，主に毛細管張力が作用していると推論された。さらに，フライアッシュの自己収縮低減効果は，水和反応による自己乾燥に起因して発生する毛細管張力とヤング率の相違では説明できず，生成した水和物が形成するゲル構造が収縮に対して示す剛性も関与しているものと推論された。

謝辞

本研究の一部は，平成 14 年度科学研究費（基盤研究(B)(2)，代表：名和豊春）により，実施しました。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

1) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.22-45，1996
2) 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
3) 堀田 智明，名和 豊春：モルタル硬化体の自己収縮に及ぼすフライアッシュ品質の影響，コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.165-170，2002
4) P.L.Domone ： Deformation of Concrete, Conctruction Materials, Eded by J.M.Illston , E & FN SPON, pp.129-154, 1994
5) 堀田智明，名和豊春：セメント系材料の自己収縮に関する研究, 日本建築学会構造系論文集，第 542 号，pp.9-15，2001.4
6) 湯浅昇ほか：埋め込みセラミックセンサーの電気特性にコンクリートの含水率測定方法の提案，日本建築学会構造系論文集，第 498 号，pp.13-20，1997
7) A. M. Neville 著，後藤幸正，尾崎芳夫監訳：ネビルのコンクリートの特性，pp.296-323，技報堂出版，1979
8) 田澤栄一，宮澤信吾：セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響, 土木学会論文集，No.502/V-25，pp.43-52，1994
9) 宮澤信吾ほか：自己収縮に及ぼすセメントの鉱物組成および粒径の影響，セメント・コンクリート論文集，No.53，pp.243-249，1999