

二つの異なる温度環境下でのフライアッシュを使用したモルタルの収縮ひずみ挙動

出雲 健司¹・名和 豊春²

¹正会員 博士(工学) 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²正会員 博士(工学) 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻

本研究は基準配合として水セメント比を25%と45%に設定し、その配合に対してフライアッシュの置換率を変化させたモルタルを雰囲気温度10°Cおよび20°C、相対湿度57±5%の恒温恒湿槽に設置して、硬化収縮および乾燥収縮の実験を行った。実験の結果、置換率を上げると硬化収縮ひずみと乾燥収縮ひずみは減少するものの、配合によっては普通ポルトランドセメントのみのモルタルよりひずみは必ずしも減少しなかった。また、硬化収縮・乾燥収縮が起きる要因として、水和反応や毛細管張力の他に細孔内の水の吸着・脱着が要因として考えられること、フライアッシュの置換率が上がると、硬化収縮・乾燥収縮共にひずみが減少する理由として、細孔内の自由水が増えることにより、水の消費・逸散に対する化学ポテンシャルの変化が少なくなるためと考えられた。

Key Words : mortar, fly ash, replaced rate, autogenous shrinkage, drying shrinkage, all shrinkage, internal relative humidity, reduction rate of mass, temperature

1. はじめに

『資源の有効活用』、『地球温暖化防止のための二酸化炭素の削減』など、地球環境の保全が21世紀初頭の現在、最も重要な課題の一つであることは言うまでもない。土木分野でもとりわけコンクリートはある意味自然破壊の象徴的な存在として社会的に認知されている感が否めない。しかしながら、同時にコンクリート構造物は社会基盤を支える上で非常に重要な役割を果たしていることも事実である。そのような状況下、少しでも地球の負担を減らそうとするための方法としてフライアッシュを使用したコンクリートがある。フライアッシュをコンクリートに使用することは資源の有効活用につながるだけでなく、セメント製造で大量に発生する二酸化炭素を抑制することもできるので、今後の使用の拡大が期待される。特に、日本も批准した京都議定書などの国際的な流れからいって、フライアッシュに関する研究はますます重要なものとなると思われる。

そのような状況下、土木学会・フライアッシュ研究小委員会が設置され、施工指針案¹⁾の作成やJIS規格の見直しなどが行われ、フライアッシュを有効に活用しようという動きもある。また、フライアッシュの一つの利点として、既報の研究²⁾でも示しているが、自己収縮・

乾燥収縮の低減効果である。自己収縮・乾燥収縮を低減させることは、コンクリートの劣化原因である内部の欠陥の発生確率を低下するのに役立つ、その結果、コンクリート構造物の耐久性向上につながると考えられる。

フライアッシュに関する既往の研究だが、フライアッシュそのものの物性試験、コンクリートの耐久試験、高流動コンクリートの流動試験など多岐に渡った研究が行われてはいるが、普通コンクリートに比べると耐久性に関するデータはまだ不足しているのが現状である。本研究の研究対象であるフライアッシュを使用したコンクリートの自己収縮・乾燥収縮もその例外ではない。

自己収縮に関しては三成分系のセメントを使っている研究で宮澤・松村³⁾の研究と、高ピーライト系のセメントを使っている松永ら⁴⁾の研究によると、フライアッシュを使用すると自己収縮が低減されるという報告がある。

乾燥収縮に関しては上野ら⁵⁾の研究のようにフライアッシュを使用すると低減される結果と、安田ら⁶⁾と深川ら⁷⁾の研究では低減される場合とあまり変わらない場合があるという報告がある。

また、収縮に関する既往の研究は、田澤らの自己収縮の予測式⁸⁾、阪田らの乾燥収縮ひずみの予測式⁹⁾、下村らの一般的な物理化学を使った乾燥収縮のメカニズム

ム^{10),11)}, 石田らの毛細管張力を基本とした自己収縮・乾燥収縮のメカニズム¹²⁾, そして, 大下らの間隙水を基本とした自己収縮のメカニズム¹³⁾など多彩であるが, いずれもフライアッシュを使用したコンクリートを対象としたものではなく, フライアッシュを使用した場合の収縮に関する研究はまだまだ発展段階と言える。

加えて, フライアッシュを使用した場合に限らず, 普通ポルトランドセメントのみの場合もそうだが, 自己収縮は水の消費, 乾燥収縮は水の逸散と, 水の挙動に関係しているメカニズムを述べているにも関わらず, 供試体内部の水の挙動に関するデータがほとんどない見当たらない。また, フライアッシュを使用した場合, 20℃以外の雰囲気温度に関するデータがほとんどない。

本研究では, 雰囲気温度10℃および20℃の二つに設定し, フライアッシュを使用したモルタルの自己収縮と乾燥収縮の基本データを取ることを第一の目的とする。また, その時の供試体内部の水の挙動を供試体内部の相対湿度として測定した。そして, これらの実験結果を基にそのデータを検討することにより, 収縮挙動の定性化と今後の課題を明確にした。

本研究の収縮の用語としては, 硬化収縮, 乾燥収縮, 全収縮の3種類を用いた。筆者らは既報の研究¹⁴⁾では, 自己収縮を打設直後から脱型までの収縮のこととしてきたが, 自己収縮研究委員会報告書¹⁵⁾では凝結始発以後に発生する収縮として定義されている。また, 委員会報告¹⁶⁾では自己収縮は水和収縮の一部であるとされているが, 筆者らは打設直後から測定したひずみを全て自己収縮としており, 委員会報告¹⁵⁾とは全く違ったものを自己収縮としていた。そこで, 本研究では混乱を避ける意味で, 本研究の用いている考え方に近い城ら¹⁶⁾が提案している硬化収縮という用語を使用する。城ら¹⁶⁾は硬化収縮は, 第一段階として, 分散している粒子間の水がセメントの水和反応で消費され, セメント粒子間の距離が急激に減少して起こる収縮の段階, 第二段階として, 剛体構造が出来上がった上に水和反応が起こり, その際発生する応力と剛体の剛性とのバランスによりゆっくり収縮もしくは膨張する段階があるとしている。ただし, 本研究で得られたデータと城ら¹⁶⁾のデータでは傾向が異なることを付け加えておく。また, 乾燥収縮は供試体を脱型した後の収縮を, 全収縮は硬化収縮と乾燥収縮の累計を示している。

筆者らは収縮のメカニズムの解明に当たり, 収縮ひずみによるエネルギー保存の法則と, 収縮応力による力のつり合いの二つの基本式を考えている。特に, エネルギー保存則を導入して理論展開しているのが筆者らの収縮メカニズムの特徴である。

系全体のエネルギーのつり合いを考えると, Gibbsの自由エネルギーから式(1)が成り立つ。

$$PdV = SdT + \sum \mu dn \quad (1)$$

ただし, P : 作用力 (収縮の駆動力)

dV : 体積変化

S : 系のエントロピー

dT : 絶対温度変化

$\sum \mu dn$: 化学ポテンシャル

ひずみは体積変化に変換して, 作用力よりエネルギーに変換できる。化学ポテンシャルとしては, 硬化収縮・乾燥収縮が生じる際, 水和生成物に対しての水の吸着・脱着によるもの, 硬化収縮が生じる際の水和反応によるものなどが考えられる。系のエントロピーに関しては, 左辺と化学ポテンシャルを求め, 温度を測定することによって, 算定することが可能であるが, 本研究では行っていない。

硬化収縮・乾燥収縮の収縮の駆動力としては, 毛細管張力の増減によるものと水和生成物そのものが吸水・脱水により変化することによって生じる収縮・膨張する力との合計と考えている。また, 水和生成物そのものが変化する際の変形力に関しては, 水和反応に伴う温度上昇による力と水の吸着・脱着による力などが考えられる。

$$P_S = P_{CT} + P_H \quad (2)$$

ただし, P_S : 収縮の駆動力

P_{CT} : 毛細管張力

P_H : 水和生成物そのものが変化する際の変形力

各収縮ひずみには弾性ひずみと塑性ひずみ (クリープ) が混在していると一般的に考えられているが, 上記の理論を適用した場合, 各収縮ひずみを弾性ひずみと塑性ひずみに分ける必要がなくなる。特に, 収縮応力は多軸的に応力が不均一に分布しているため, 一軸等価応力下での試験で得られたクリープを適用することが不可能と考えられ, また, 収縮応力をモデル実験で再現することが難しいことから本研究のメカニズムは有利である。

応力に関しては, 有効弾性係数と弾性ひずみより応力を算定する方法もあるが, 有効弾性係数は物理理論としての裏付けがあるわけではないので, 使用材料や配合などの影響を受けるなど, 一般性に欠けると考えられる。また, 本研究は物理化学の理論を基にメカニズムを構築しているため, 有効弾性係数などは一線を画すものである。したがって, 筆者らは直接応力を測ることにより, 式(2)を構築する予定である。

以上, 収縮のメカニズムの解明のためのプロセスを述

べたが、本研究ではひずみのみに関して論じており、応力については論じておらず、今後の課題である。また、本研究の第二の目的として、筆者らが提案したメカニズムに基づき、式(1)の左辺の体積変化のデータと式(2)の毛細管張力のデータを収集することにある。

2. 実験概要

(1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm³），フライアッシュ（密度：2.21g/cm³，ブレン値：2660 cm²/g，J I S II種に相当），細骨材には鶴川産川砂（密度：2.70g/cm³）を使用している。目標のモルタルのフロー値200±20mmを得るためにポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を適量使用している。なお、各材料は20℃一定で保管した。本研究で使用したモルタルの配合を表-1、表-2に示す。本研究では基本配合を水セメント比25%と45%の二つに設定し、それらを10, 30, 60%の容積置換率により、フライアッシュで置換している。

(2) 硬化収縮の測定法

硬化収縮測定用にφ50×100mmの供試体を使用している。供試体は打設直後に封緘し、10℃と20℃に一定に保たれているそれぞれの恒温恒湿槽に設置し、材齢182日まで測定した。図-1に硬化収縮測定の概略図を示す。測定方法は堀田らの研究⁷⁾に準拠して、埋め込み式のひず

表-1 モルタルの配合（水セメント比25%シリーズ）

記号	単位量(kg/m ³)				sp(%)
	W	C	FA	S	
M25	265	1060	0	1022	2.00
M25-FA10		954	74		0.96
M25-FA30		742	223		0.63
M25-FA60		424	446		0.52

表-2 モルタルの配合（水セメント比45%シリーズ）

記号	単位量(kg/m ³)				sp(%)
	W	C	FA	S	
M45	265	589	0	1426	0.40
M45-FA10		530	41		0.40
M45-FA30		412	124		0.40
M45-FA60		236	248		0.30

みゲージを用いて測定している。ひずみゲージはペーパーゲージにシリコンを被膜してベースとしており、その弾性係数は約1N/mm²と非常に小さいため、高感度にひずみを測定することが出来る。なお、供試体には熱電対が埋め込まれており、この熱電対で測定した温度によりひずみゲージの温度補正を行っている。また、モルタルが体積変化する際に、型枠とモルタルとの間に生じる摩擦を低減するためにテフロンシートを使用している。

(3) 乾燥収縮の測定法

本研究で使用した供試体の概略図を図-2に示す。この図に示した40×40×160mmの角柱供試体を10℃および20℃に設定した恒温恒湿槽で、1週間封緘養生した後、脱型して相対湿度57±5%の雰囲気中に設置した。

乾燥収縮ひずみの測定法は「JIS A 1129」に準拠して、コンタクトゲージを使用しており、それと同時に供試体の質量減少率も測定している。なお、測定材齢は材齢182日までとした。

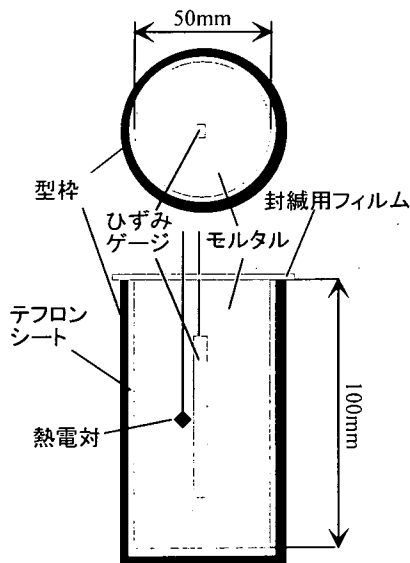


図-1 硬化収縮測定用供試体

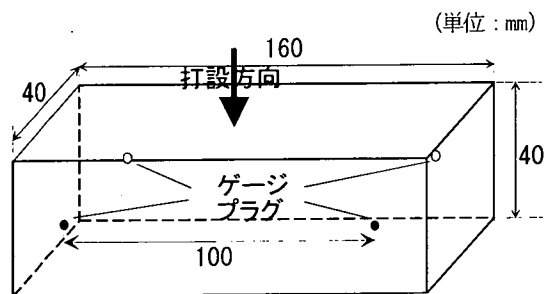


図-2 乾燥収縮測定用供試体

(4) 供試体内部の相対湿度の測定法

本研究で使用した供試体の概略図を図-3に示す。この図に示すように、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を使用し、打設直後に封緘して、 10°C および 20°C に設定した恒温恒湿槽に設置した。なお、乾燥収縮供試体の内部の相対湿度測定は乾燥収縮ひずみ測定用供試体と同様に、1週間後に脱型して相対湿度 $57 \pm 5\%$ の雰囲気中に設置し、測定を行った。

供試体内部の相対湿度への算定は既報の研究¹⁸⁾に準じて行った。セラミックセンサーの抵抗値と内部の相対湿度の関係は、あらかじめ塩類の飽和水蒸気圧により相対湿度の定点を作り、その中にセラミックセンサーを入れて、抵抗値を測ることによって得た。ただし、相対湿度57%付近で測定がほぼ不可能になるので、相対湿度57%付

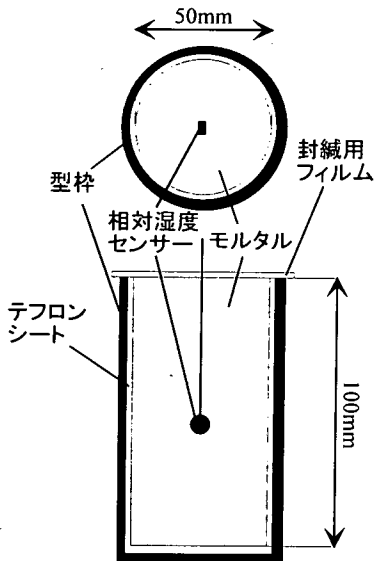


図-3 内部の相対湿度測定用供試体

近に達した場合はそこで測定を終了した。

3. 実験結果と考察

(1) 硬化収縮

図-4に水セメント比25%のシリーズの硬化収縮ひずみを示す。これらの図に示されるように、セメントのみの配合を除くと、材齢20日程度までは雰囲気温度 10°C の置換率30%と60%は逆転しているが、それ以降の長期材齢での硬化収縮ひずみ量は雰囲気温度に関わらず、置換率が上がるほど小さい。また、雰囲気温度 20°C 、置換率10%の配合以外はセメントのみの配合と比較して硬化収縮ひずみ量が小さい。

図-5に水セメント比45%シリーズの硬化収縮ひずみを示す。雰囲気温度 10°C では、置換率によって性状が様々で、現在のところ置換率による一律的な見解を得られていない。ただし、置換率が30%を越えると、セメントのみの硬化収縮ひずみより小さくなり、置換率30%の配合に関しては僅かではあるが膨張の傾向が見られる。雰囲気温度 20°C では、置換率が上がるほど硬化収縮ひずみは小さくなり、置換率30%、60%の配合ではむしろ膨張傾向にある。また、置換率10%の配合でも材齢約40日までは膨張傾向にある。

図-4と図-5より、フライアッシュの置換率を上げると硬化収縮ひずみの減少につながるが、配合・雰囲気温度によっては普通ポルトランドセメントのみの配合より硬化収縮ひずみが大きくなることも十分ありうと思われる。つまり、置換率ごとにひずみの減少率が比例関係になるとは限らないと思われる。また、Shehataら¹⁹⁾の研究によると、フライアッシュを使用することにより水和生成物C-S-H（ケイ酸カルシウム水和物）のCaO/SiO₂比が大きく変わることが予想される。C-S-Hは

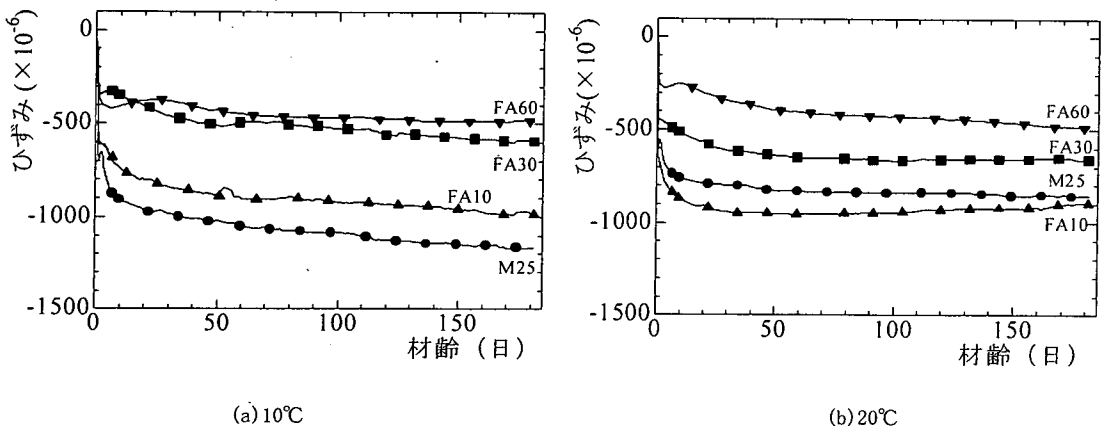


図-4 水セメント比25%シリーズの硬化収縮ひずみ

CaO/SiO₂比によって様々な性質を持つためにその性質が硬化収縮に影響するのではないかと考えられる。したがって、今後、水和生成物の分析が必要である。

図-6に雰囲気温度による硬化収縮ひずみへの影響を示す。(a)に示されるように、水セメント比25%のシリーズでは初期材齢では雰囲気温度20℃の方が硬化収縮ひずみは大きいですが、長期材齢では雰囲気温度10℃の方が硬化収縮ひずみ大きい傾向がある。また、(b)に示されるように、水セメント比45%シリーズでは雰囲気温度10℃の方が20℃に比べて大きい傾向がある。これらの結果より、硬化収縮ひずみは雰囲気温度によって一義的に決まるものでは決まらなると考えられる。

図-7に水セメント比25%シリーズの硬化収縮供試体の内部相対湿度を示す。雰囲気温度に関わらず、セメントのみの配合を除けば、フライアッシュの置換率順に、置換率の小さい配合が内部の相対湿度が低い。また、これも雰囲気温度に関わらず、置換率60%の配合で、材齢10日前後で内部の相対湿度が上昇している。これらの供試

体は外部からの水の供給を受けていない以上、ポズラン反応によって内部で水が生成されていると考えられる。ただし、このことを実証するためには水和生成物の変化を化学的に分析して確認する必要がある。また、水の供給を受けている期間でも硬化収縮ひずみは増大している。

図-8に水セメント比45%シリーズの材齢182日までの硬化収縮供試体の内部相対湿度を示す。これらの図に示されるように、雰囲気温度に関わらず、置換率が小さいほど内部の相対湿度が低い傾向が見られる。

また、図-7と図-8より、膨張している供試体以外は、内部の相対湿度の低下が緩やかになると、硬化収縮ひずみの増加も緩やかになる傾向が見られた。化学反応である水和反応は反応物質の濃度の影響を受けて反応が進むものであり、内部の相対湿度が低くなると、つまり、反応物質の濃度が低くなると、当然反応が鈍るはずである。したがって、水和反応に起因して発生する硬化収縮ひずみも反応が鈍ると増加しなくなると考えられる。た

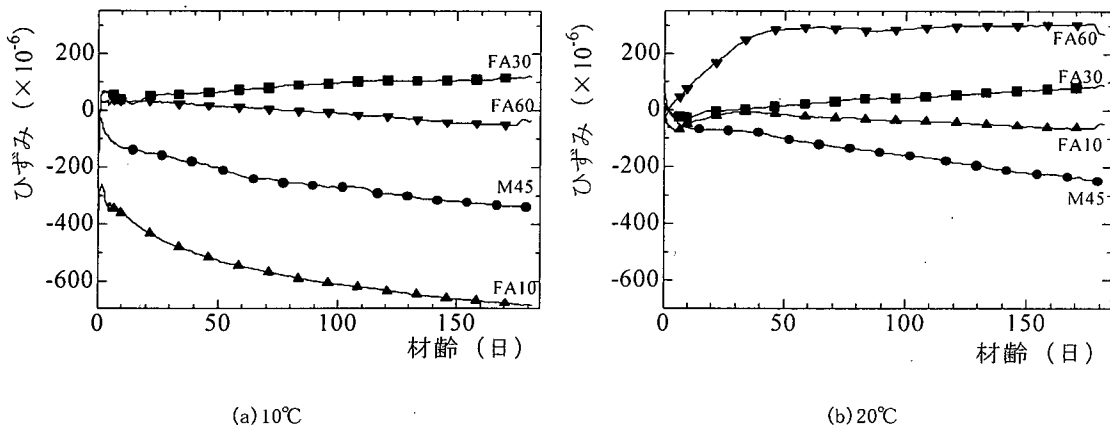


図-5 水セメント比45%シリーズの硬化収縮ひずみ

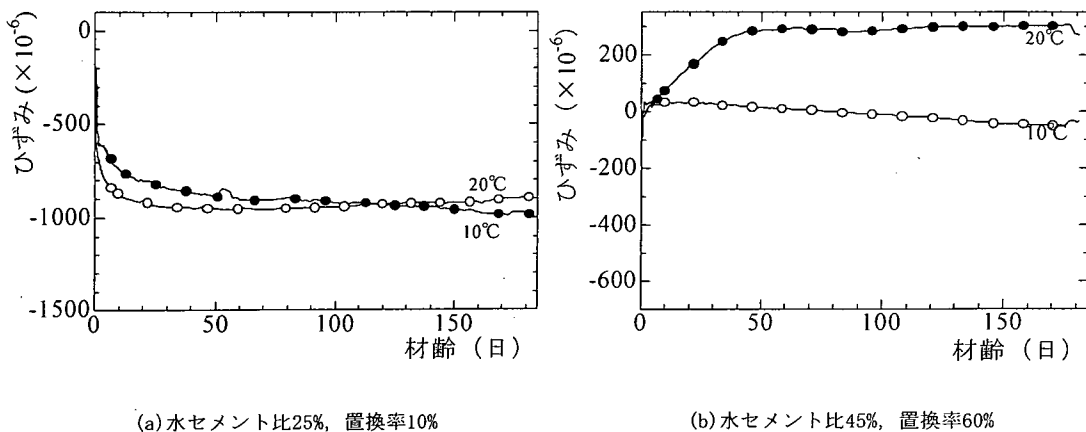


図-6 雰囲気温度による硬化収縮ひずみへの影響

だし、水和反応に必要な内部の相対湿度は現段階では配合によって異なることしか分かっておらず、その定量化は今後の課題である。また、膨張理由についても今後の課題である。

図-9に雰囲気温度による硬化収縮供試体の内部の相対湿度への影響を示す。代表例として置換率30%の供試体を(a)に示すが、置換率が10%、30%の供試体は配合条件に関わらず、雰囲気温度10°Cの方が20°Cに比べ、内部の相対湿度が低い傾向にあるが、それほど大きな差は見られない。(b)に示すように、置換率が60%の場合、初期材齢では一時的には雰囲気温度10°Cの方が20°Cに比べ、内部の相対湿度が低くなるが、その後、雰囲気温度10°Cの方の内部の相対湿度が高くなり、材齢182日ではあまり大きな差はなくなる。

図-10に水セメント比25%シリーズの内部の相対湿度と硬化収縮ひずみの関係を示す。ここでは傾向別に置換率10%、30%と置換率60%の配合に分けている。(a)に示され

るように、まず、第一段階として、打設直後は内部の相対湿度が高く保たれたまま硬化収縮ひずみが増加している区間がある。その区間は置換率が低いほどひずみ量が大きく、雰囲気温度20°Cの方がひずみ量が大きい傾向がある。また、第二段階として、置換率によって低下する勾配が異なるものの、内部の相対湿度が下がると共に硬化収縮ひずみが増加する区間がある。そして、その後、第三段階として、内部の相対湿度の低下はそれほどないが硬化収縮ひずみが第二段階と比べると増大するという区間がある。

第一段階では、セメント硬化体の構造体が出来上がっていない時期であり、内部応力を蓄えることができない。したがって、このひずみはクリープではなく、水和反応によるエネルギーの変化によるひずみの変化と考えられる。言い換えると、水和生成物そのものの変形によるひずみと考えられる。

毛細管張力理論によると、Kelvinの式とLaplaceの

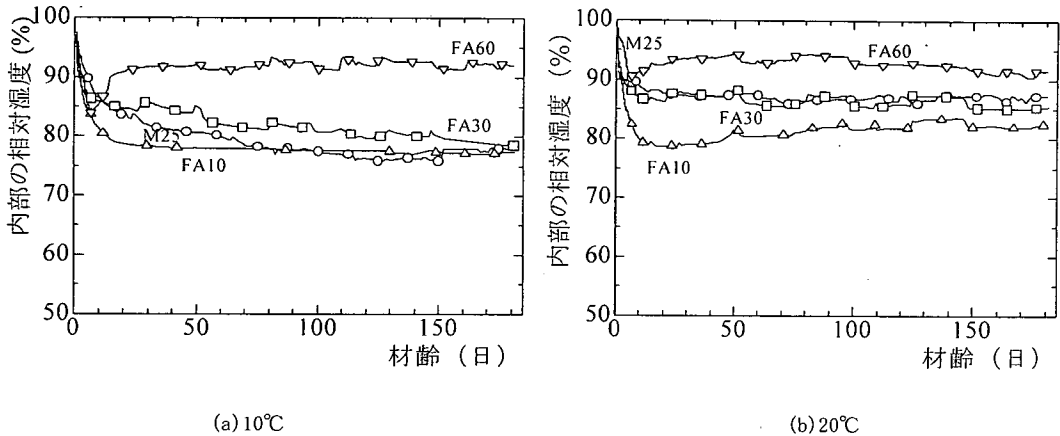


図-7 水セメント比25%シリーズの硬化収縮供試体の内部相対湿度

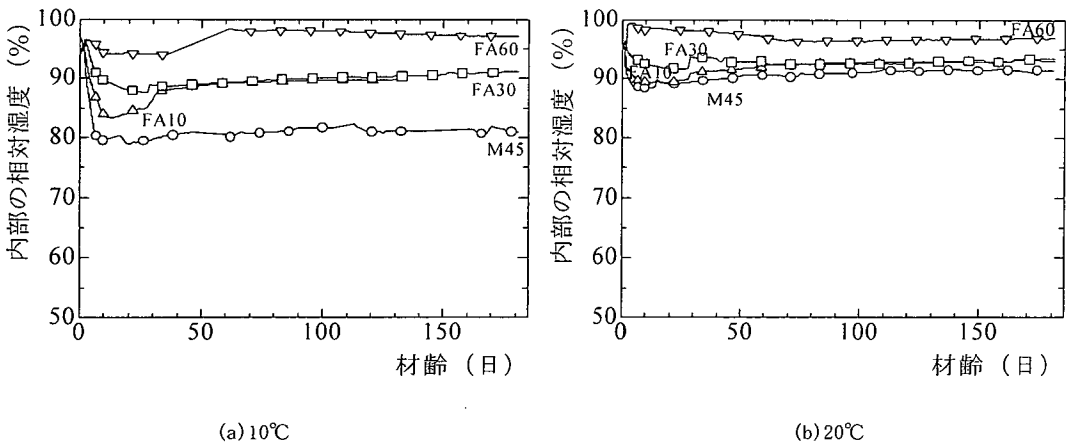
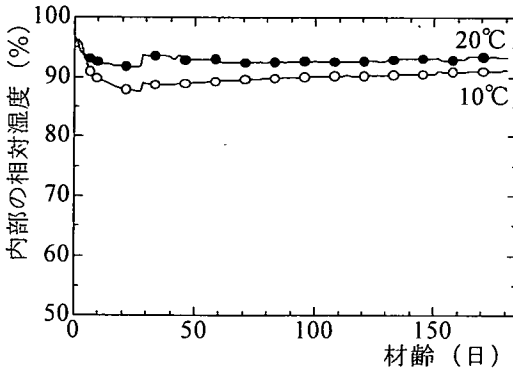
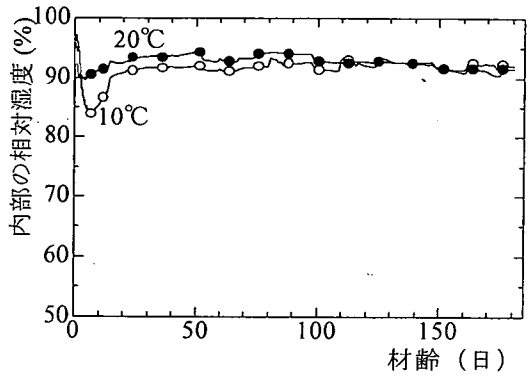


図-8 水セメント比45%シリーズの硬化収縮供試体の内部相対湿度



(a) 水セメント比45%, 置換率30%



(b) 水セメント比25%, 置換率60%

図-9 雰囲気温度による硬化収縮供試体の内部の相対湿度への影響

式, そして, フックの法則より, 収縮ひずみ ϵ を求める次式が成り立つ.

$$\epsilon = -\frac{1}{E} \frac{RT\rho_L}{M_W} \ln \frac{P_V}{P_{V0}} \quad (3)$$

ただし, E : 弾性係数(Pa)

R : 気体定数(J/mol \cdot K)

T : 絶対温度(K)

ρ_L : 液状水の密度(kg/m 3)

M_W : 水の分子量(kg/mol)

P_V/P_{V0} : 相対湿度

この式(3)に基づいた場合, 置換率が上がると弾性係数が下がるので, 第二段階では置換率が大きいほど, 内部の相対湿度の低下に対する硬化収縮ひずみ量が大きくなるはずであるが, 実験結果ではその逆を示している. また, 硬化収縮ひずみの中にクリープが含まれているとするなら, 第二段階から第三段階の移行する時, クリープの増加量に屈曲点が生じてしまう点が説明がつかない.

図-10(b)に水セメント比25%シリーズの置換率60%の配合のものを示すが, この図に示されるように, 内部の相対湿度が上昇しているのにも関わらず, 式(3)に基づくような硬化収縮ひずみの減少が見られず, 逆にひずみが増大した.

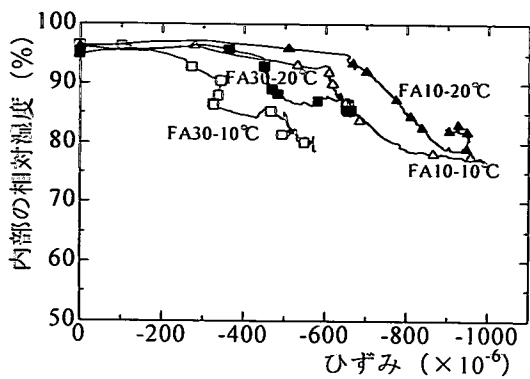
図-11に水セメント比45%シリーズの内部の相対湿度と硬化収縮ひずみの関係を示す. これらの図に示されるように, 水セメント比25%シリーズのような検討をするのは難しい. 特に, 雰囲気温度20 $^{\circ}$ Cでは内部の相対湿度によって硬化収縮ひずみを論じることができず, 従来考えられているように, 内部の相対湿度が低下すると, 硬化収縮ひずみが増大し, 内部の相対湿度が増加すると, 硬

化収縮ひずみが減少するという一律的な傾向は全くない.

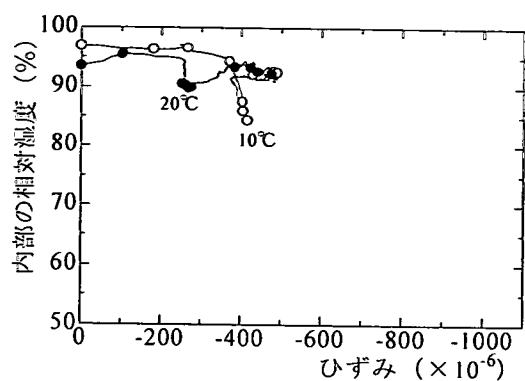
以上, 図-10, 図-11に示されるように, 打設直後においては自己乾燥状態以外の要因で硬化収縮ひずみは増大している. また, 内部の相対湿度が上昇しているにもかかわらず, 硬化収縮ひずみが増大している場合がある. これらのことは, 毛細管内の水の消費や水の供給などによって一律に硬化収縮ひずみは決まらないことを示唆しており, 普通コンクリートで適用されている各種メカニズムのみでは説明ができない. 内部の相対湿度の増減, 言い換えれば, 毛細管内の水蒸気圧によって一律に硬化収縮ひずみが決まらないということは毛細管張力以外の要因が働いていると考えられ, 水和反応やポゾラン反応に起因する細孔内の水の吸着・脱着も要因として存在するのではないかと考えられる. 細孔内の水の吸着・脱着は化学ポテンシャルを変化させるだけではなく, 収縮応力も変化させると考えられる. したがって, 毛細管張力と水の吸着・脱着によって収縮応力が決まり, 水和反応によって出来上がった構造体とのバランスによって硬化収縮ひずみが決まるのではないかと考えられる. また, この時, 式(1)に示されるようにエネルギー保存則が成り立つと考えられる. 以上のことより, 水和反応の定量化と同時に水和生成物の分子構造や形成される微細空隙の解明など, 微視的な視点に立った研究が必要と思われる.

(2) 乾燥収縮

図-12に水セメント比25%シリーズ, 図-13に水セメント比45%シリーズの乾燥収縮ひずみを示す. これらの図に示されるように, 普通ポルトランドセメントのみの配合を除くと, 配合条件・雰囲気温度に関わらず, フライアッシュの置換率を上げると, 乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向が見られた. また, 水セメント比45%シリーズ

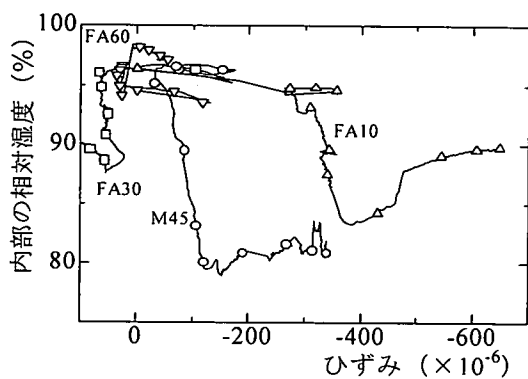


(a) FA10, FA30

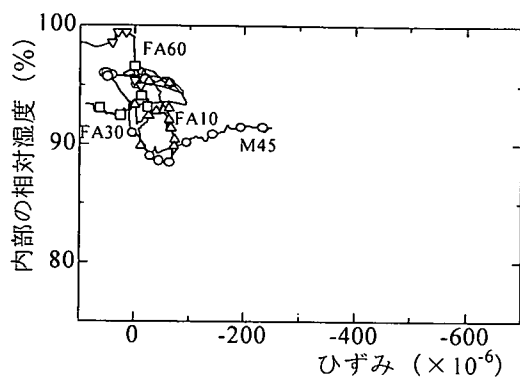


(b) FA60

図-10 水セメント比25%シリーズの内部相対湿度と硬化収縮ひずみの関係

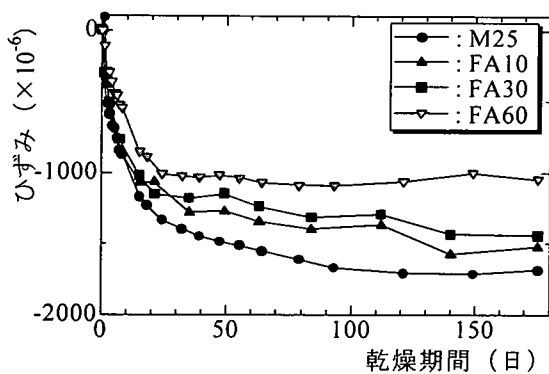


(a) 10°C

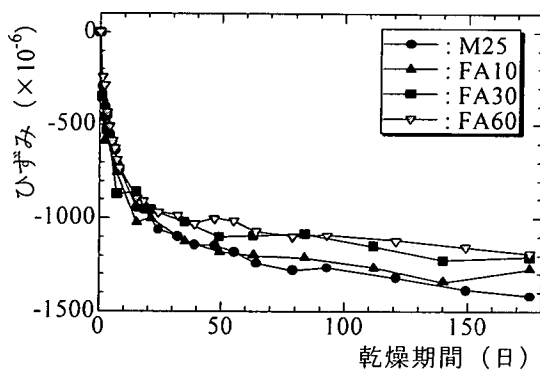


(b) 20°C

図-11 水セメント比45%シリーズの内部相対湿度と硬化収縮ひずみの関係

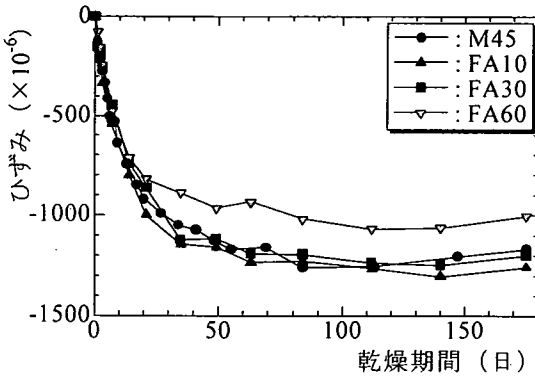


(a) 10°C

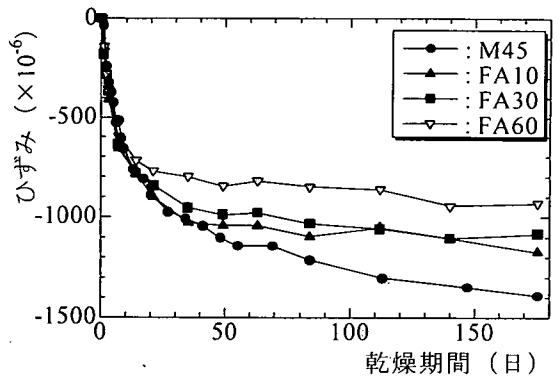


(b) 20°C

図-12 水セメント比25%シリーズの置換率による乾燥収縮ひずみ

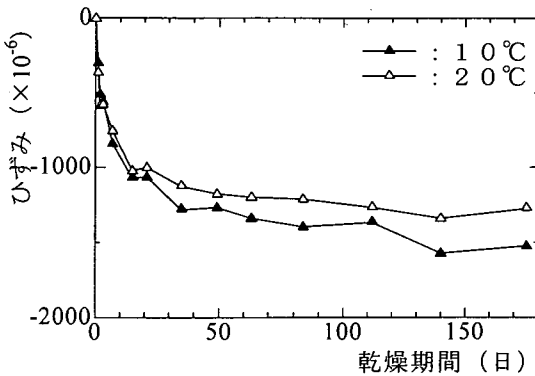


(a) 10°C

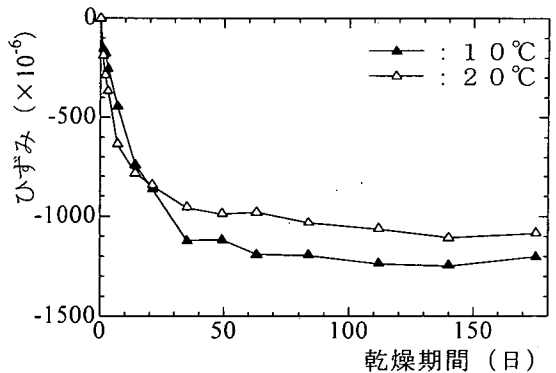


(b) 20°C

図-13 水セメント比45%シリーズの置換率による乾燥収縮ひずみの比較



(a) 水セメント比25%, 置換率10%



(b) 水セメント比45%, 置換率30%

図-14 雰囲気温度による乾燥収縮ひずみへの影響

の雰囲気温度10°C以外では、置換率が上がるほど、乾燥収縮ひずみが低減した。

図-14に温度による乾燥収縮ひずみへの影響を示す。これらの図に示されるように、同一配合の条件下では、配合によらず、雰囲気温度10°Cの方が材齢182日での乾燥収縮ひずみは大きい傾向が見られた。

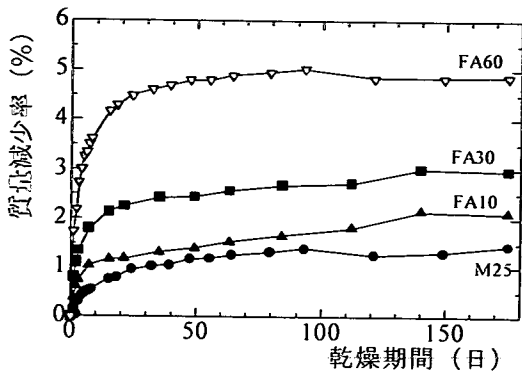
図-15に水セメント比25%シリーズの質量減少率を示す。これらの図に示されるように、雰囲気温度や配合条件に関わらず、置換率が上がると、質量減少率が大きくなっている。一般的に水の逸散量が大きいほど、乾燥収縮ひずみは大きいと考えられているが、図-12より質量減少率が大きい供試体ほど乾燥収縮ひずみは大きい傾向はなく、むしろ、その逆の傾向を示している。このことは、水の逸散量が必ずしも乾燥収縮に結びつくというわけではないことを示している。この傾向は水セメント比45%シリーズでも同様な傾向を示している。

図-16に水セメント比25%シリーズの乾燥収縮供試体の

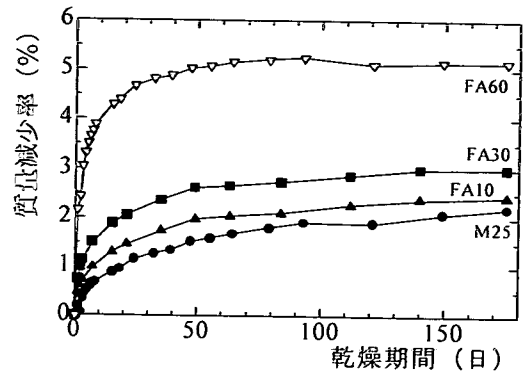
内部の相対湿度を示す。これらの図に示されるように、雰囲気温度に関わらず、置換率が上がると内部の相対湿度の低下が速い傾向が見られる。

図-17に水セメント比45%シリーズの乾燥収縮供試体の内部の相対湿度を示す。これらの図に示されるように、雰囲気温度に関わらず、置換率で一律に内部の相対湿度の低下を論じることができない。ただし、雰囲気温度10°Cの置換率30%ではほぼ材齢100日で、置換率10%ではほぼ130日で内部の相対湿度は平衡に達している。

また、図-16と図-17に示されるように、内部の相対湿度の低下が緩やかになると、図-12と図-13に示されるように、乾燥収縮ひずみも横這いになる。乾燥収縮ひずみは水の逸散に起因するもので、水の逸散、言い換えれば、内部の相対湿度の低下量が大きい場合は乾燥収縮ひずみが大きくなると一般的には考えられている。しかし、図-12と図-16に示されるように、内部の相対湿度の低下が速い配合が遅い配合に比べて、ひずみ量大きい

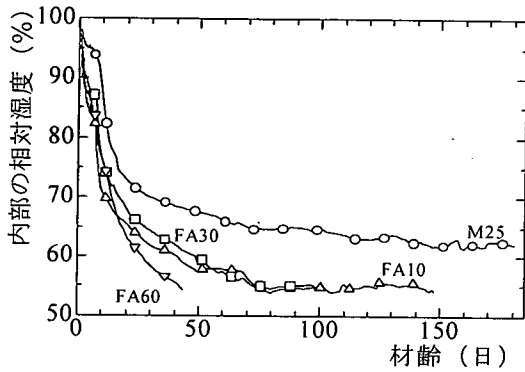


(a) 10°C

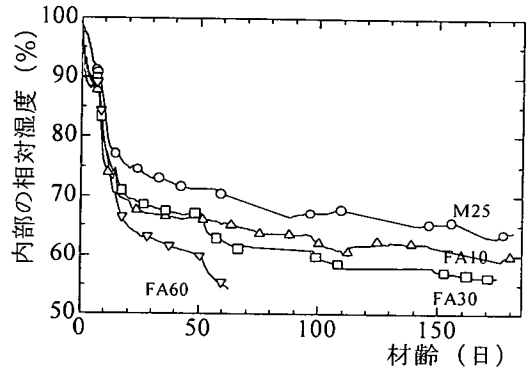


(b) 20°C

図-15 水セメント比25%シリーズの質量減量率

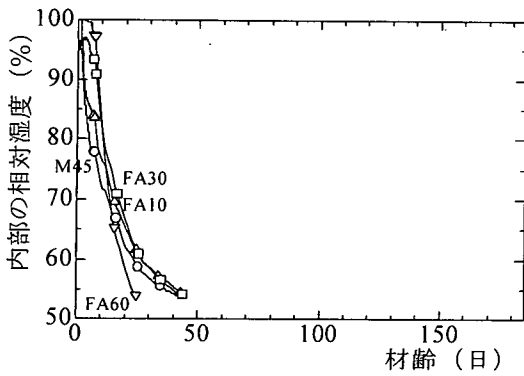


(a) 10°C

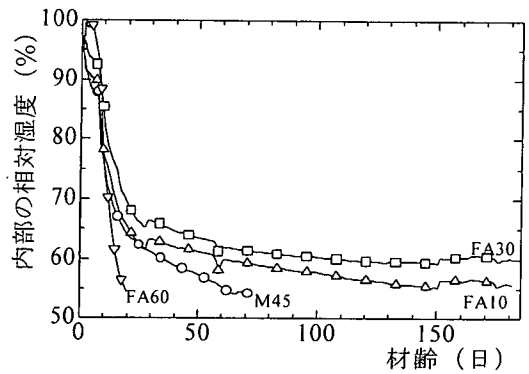


(b) 20°C

図-16 水セメント比25%シリーズの乾燥収縮供試体の内部の相対湿度



(a) 10°C



(b) 20°C

図-17 水セメント比45%シリーズの乾燥収縮供試体の内部の相対湿度

という傾向はない。このことは水の逸散が直接乾燥収縮には結びつかないことを意味している。また、モルタル中の水は自由水、吸着水など様々な形態をとっている。その水の形態により水の逸散するときの化学ポテンシャルが異なるので乾燥収縮ひずみ量も異なると思われる。一方、配合・雰囲気温度によって大きく水和生成物が異なるが、そのことにより吸着水の量が異なることから水和生成物の解析、吸着水量の測定などを行わなくてはならないと考えられる。

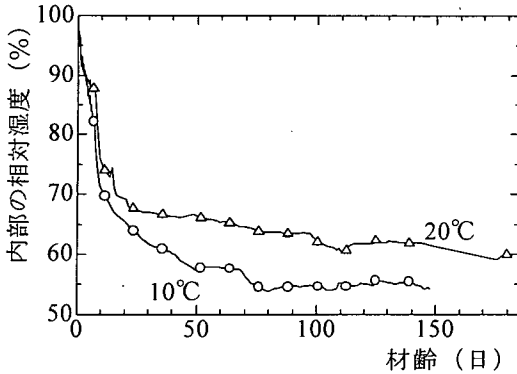
図-16と図-17に示されるように、供試体内部の相対湿度は脱型と共に急激に低下し、図-7と図-8に示されるように硬化収縮に必要な内部の相対湿度を下回るため、本研究の乾燥収縮ひずみには硬化収縮ひずみは含まれていないものと考えられる。

図-18に雰囲気温度による乾燥収縮供試体の内部の相対湿度への影響を示す。これらの図に示されるように、配合によらず、雰囲気温度10℃の方が20℃に比べると、

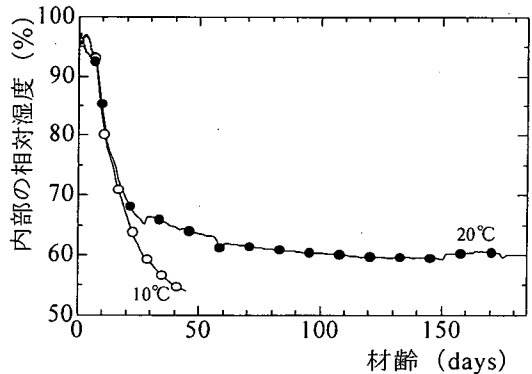
内部の相対湿度の低下が速い。

図-19に水セメント比25%シリーズ、図-20に水セメント比45%シリーズの質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係を示す。これらの図に示されるように、雰囲気温度・配合条件に関わらず、置換率の順に質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係が序率的に決まる。また、置換率が高いほど、同一乾燥ひずみ量に対しての質量減少率が大きい傾向が見られた。また、質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係が2直線なので、水の逸散量のみから成る単なる拡散方程式で乾燥収縮ひずみを算定するのは難しいと思われる。

図-21に水セメント比25%シリーズ、図-22に水セメント比45%シリーズの内部の相対湿度と乾燥収縮ひずみの関係を示す。これらの図の起点は乾燥開始材齢である。これらの図に示されるように、内部の相対湿度の起点は水セメント比25%シリーズの場合はセメントのみの配合が一番高い。水セメント比45%シリーズの場合はセメン

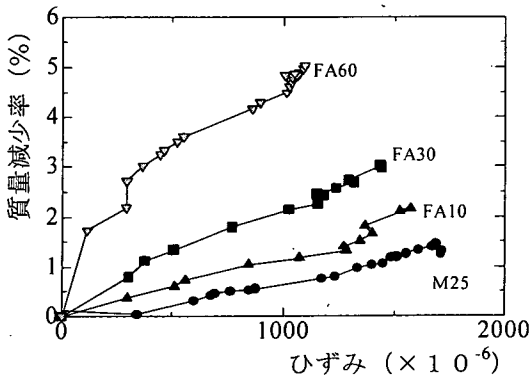


(a)水セメント比25%, 置換率10%

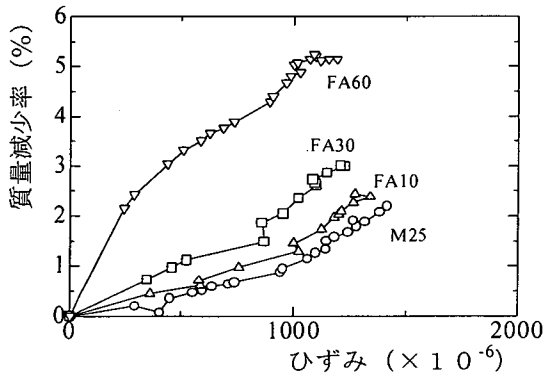


(b)水セメント比45%, 置換率30%

図-18 雰囲気温度による乾燥収縮供試体の内部の相対湿度への影響

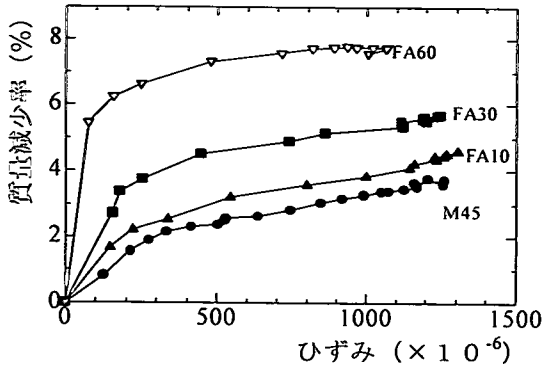


(a)10℃

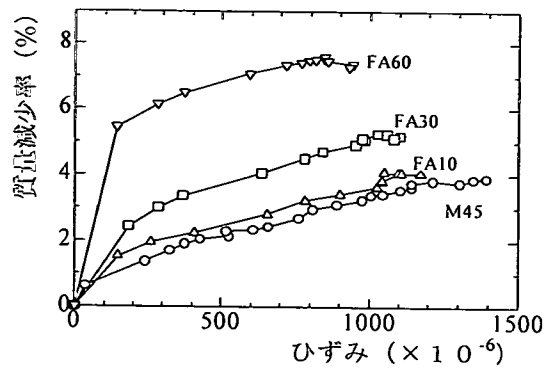


(b)20℃

図-19 水セメント比25%シリーズの質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

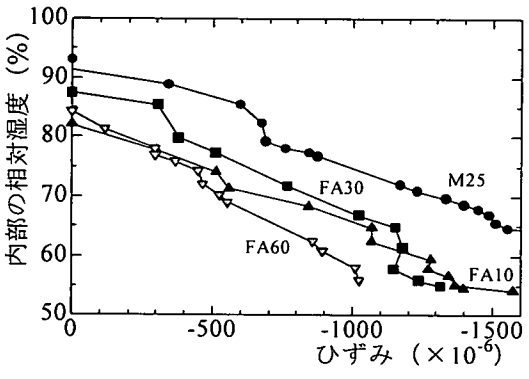


(a) 10°C

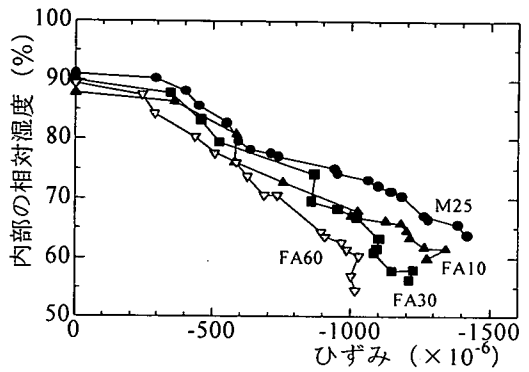


(b) 20°C

図-20 水セメント比45%シリーズの質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

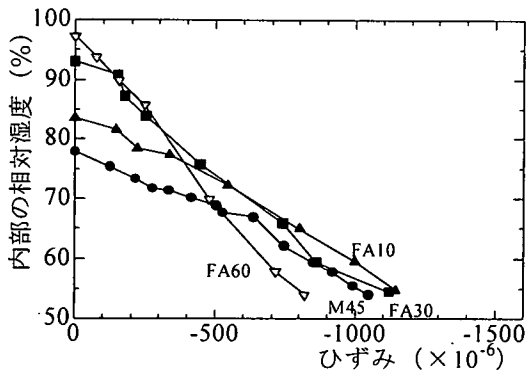


(a) 10°C

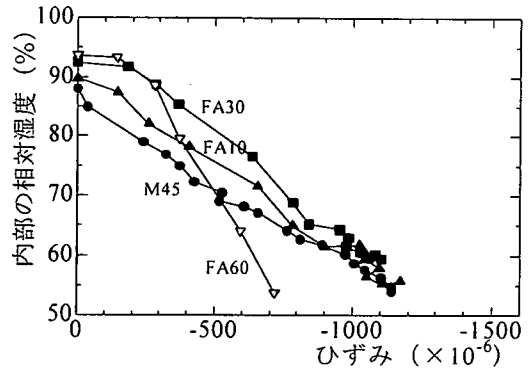


(b) 20°C

図-21 水セメント比25%シリーズの内部の相対湿度と乾燥収縮ひずみの関係



(a) 10°C



(b) 20°C

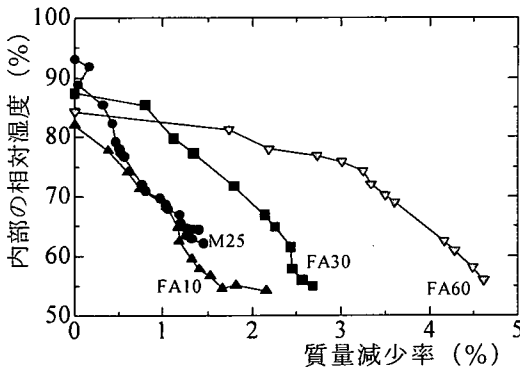
図-22 水セメント比45%シリーズの内部の相対湿度と乾燥収縮ひずみの関係

トのみの配合が一番低く、置換率が上がるほど高くなる傾向が見られた。また、雰囲気温度・配合条件に関わらず、置換率が上がるほど、内部の相対湿度の低下に伴う乾燥収縮ひずみ量が小さい傾向が見られた。

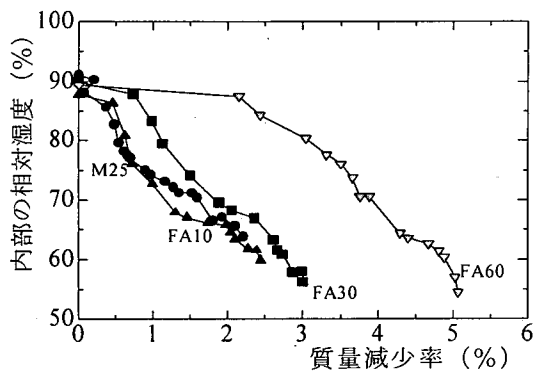
式(3)のように、毛細管張力などに代表されるように、乾燥収縮ひずみを発生させる応力が水の逸散による毛細管張力のみによるものと考え、応力は内部の相対湿度の低下の関数になる。したがって、毛細管張力のみでこの現象を説明しようとする、置換率が小さいほどモルタルの弾性係数が小さくなるという既往の研究とは矛盾する説明となる。逆に置換率が小さいほど弾性係数が高いと考えると、乾燥収縮ひずみに含まれるクリープが無置換の方が大きいという説明になり、一般的に言われていることと整合しており、一見正しいように思われる。水セメント比25%シリーズにおいて雰囲気温度20°Cの内部の相対湿度が80%から70%に変化する場合を考えてみると、セメントのみの配合のひずみ増分量は約 700×10^{-6} 、置換率60%の場合は約 300×10^{-6} である。置換

率60%の弾性係数をセメントのみの配合の70%²⁰⁾と仮定として計算すると、置換率60%の場合に含まれるクリープがほとんど0としても、セメントのみの場合はクリープが約 490×10^{-6} となり、乾燥収縮ひずみの半分以上がクリープになってしまう。これらのことから、乾燥収縮の要因として毛細管張力の他に、水が逸散することにより、細孔内の水が脱着することによる化学ポテンシャルと収縮応力の変化が要因として考えられる。したがって、水和生成物によって乾燥収縮ひずみの挙動が異なることを示しており、乾燥収縮のメカニズムを解明する上では水和生成物の分析が必要であると考えられる。

図-23に水セメント比25%シリーズ、図-24に水セメント比45%シリーズの内部の相対湿度と質量減少率の関係を示す。これらの図に示されるように、水セメント比25%のセメントのみの配合と水セメント比25%シリーズで雰囲気温度10°C、置換率10%の配合以外は全て2直線の関係を示しており、それぞれの雰囲気温度・配合でその傾きが異なる。また、水セメント比25%シリーズのセメ

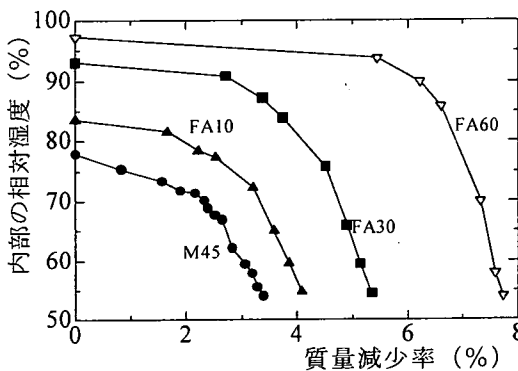


(a) 10°C

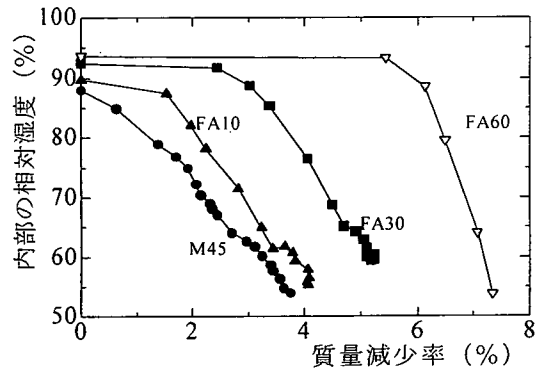


(b) 20°C

図-23 水セメント比25%シリーズの内部の相対湿度と質量減少率の関係



(a) 10°C



(b) 20°C

図-24 水セメント比45%シリーズの内部の相対湿度と質量減少率の関係

ントのみの配合を除くと、雰囲気温度・配合条件に関わらず、内部の相対湿度と質量減少率の関係は置換率の順に序列ができる傾向が見られる。また、置換率が上がるほど、内部の相対湿度が保たれたまま質量減少率が増加する期間が長い。その後、置換率が上がるほど、水セメント比25%シリーズでは内部の相対湿度の低下量に対しての質量減少率が大きく、水セメント比45%シリーズでは内部の相対湿度の低下量に対しての質量減少率が小さくなる傾向がある。このことより、各配合によって水和生成物が大きく異なり、その水和生成物によって水が逸散するときの化学ポテンシャルが大きく異なることが示された。

また、屈曲点では水の逸散が自由水から吸着水に変わるために、化学ポテンシャルの減少量が異なると考えられる。このことから、フライアッシュの置換率を上げた場合、細孔内の自由水が増大することを示している。つまり、置換率を上げると細孔内の自由水が増大するということは、水の消費・逸散の際の化学ポテンシャルの減

少が少なくなることから硬化収縮・乾燥収縮共に収縮ひずみが減少すると考えられる。

(3) 全収縮

図-25に水セメント比25%シリーズ、図-26に水セメント比45%シリーズの全収縮ひずみを示す。記号の白抜きが硬化収縮ひずみで、黒塗りが全収縮ひずみである。これらの図に示されるように、セメントのみの配合を除いた場合、雰囲気温度に関わらず、置換率が上がるほど、全収縮ひずみは小さくなる傾向がある。また、雰囲気温度20℃、水セメント比25%で置換率10%、雰囲気温度10℃水セメント比45%で置換率10%の配合以外は、セメントのみの配合と比較して、全収縮ひずみを低減しており、また、置換率が上がると、その低減効果が高まっている。

図-27に雰囲気温度による全収縮ひずみへの影響を示す。(a)に示すように、水セメント比25%の場合は雰囲気温度によって全収縮ひずみはそれほど大きな差はない。

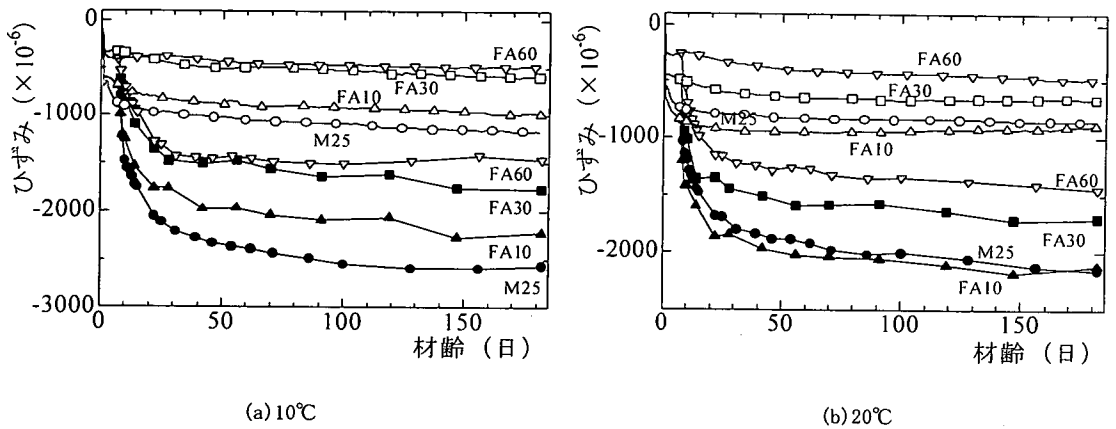


図-25 水セメント比25%シリーズの全収縮ひずみ

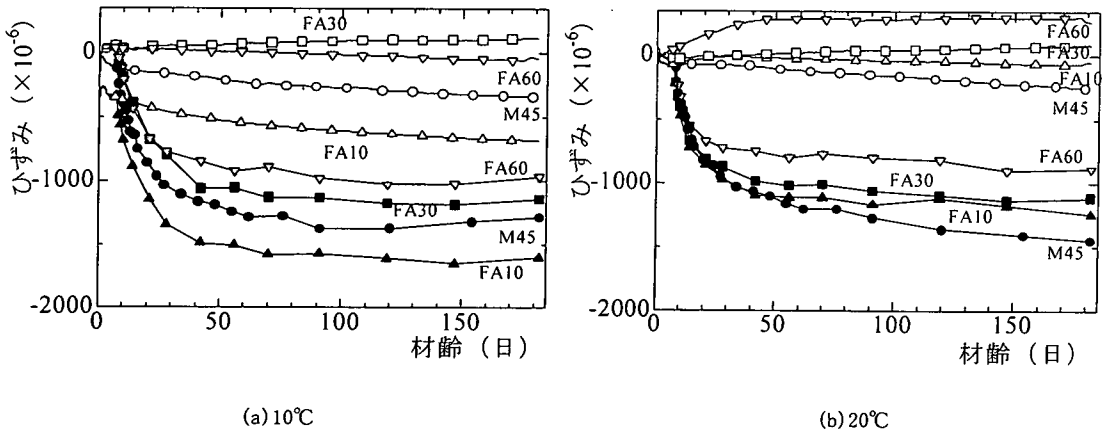
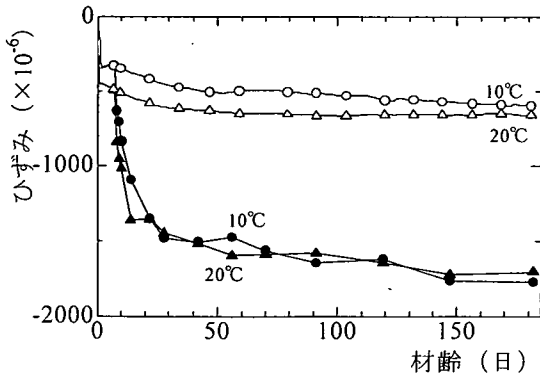
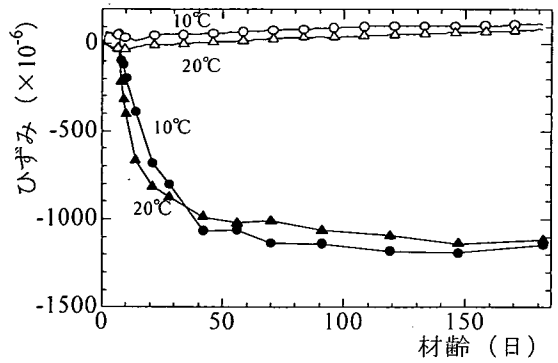


図-26 水セメント比45%シリーズの全収縮ひずみ



(a) 水セメント比25%, 置換率30%



(b) 水セメント比45%, 置換率30%

図-27 雰囲気温度による全収縮ひずみの比較

(b)に示すように、水セメント比45%の場合は初期材齢は雰囲気温度20°Cの方が全収縮ひずみが大さいが、長期材齢になると、雰囲気温度10°Cの方が全収縮ひずみが大さい傾向が見られたが、最終的な全収縮ひずみの差はあまり大きくはなかった。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 材齢182日において、セメントのみの配合を除いた場合、雰囲気温度・配合条件に関わらず、フライアッシュの置換率が大きくなるほど、硬化収縮ひずみと乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向がある。また、雰囲気温度20°Cで水セメント比25%シリーズの置換率10%、雰囲気温度10°Cで水セメント比45%シリーズの置換率10%の配合以外はフライアッシュによる全収縮ひずみの低減効果があり、置換率が上がるほど低減効果も上がった。
- 2) 長期材齢において、同一配合の場合、雰囲気温度が10°Cの方が20°Cに比べ、乾燥収縮ひずみが大さい傾向がある。
- 3) 雰囲気温度・配合条件によらず、フライアッシュの置換率が上がると、質量減少率が大くなる。
- 4) 雰囲気温度・配合条件によらず、フライアッシュの置換率が上がると、内部の相対湿度の低下量に対する乾燥収縮ひずみ量が小さくなる。
- 5) 雰囲気温度・配合条件によらず、フライアッシュの置換率が上がると、内部の相対湿度が保たれたまま質量減少率が増加する期間が長い。また、その後の、内部相対湿度の低下量に対する質量減少率の増加量が小さい。
- 6) 硬化収縮・乾燥収縮共にその要因として、水和反応や毛細管張力の他に細孔内の水の吸着・脱着による化学

ポテンシャルと収縮応力の変化が要因として考えられる。

7) フライアッシュの置換率を上げると細孔内の自由水の割合が増大し、水の消費・逸散の際の化学ポテンシャルの減少が少なくなるので、硬化収縮・乾燥収縮共にひずみが小さくなると考えられる。

以上数々の知見が得られたが、フライアッシュを使用した場合、硬化収縮、乾燥収縮共にメカニズムを解明するためには使用材料が変化しても耐えうる物理化学に基づいたメカニズムが必要と考えられる。その上で、本当の意味での微視的な視点が必要であり、そのためには、水和反応と収縮の相関関係を論じるだけでなく、水和生成物の分子構造や形成される空隙構造の定量的な解明などが今後の課題と考える。

謝辞：本研究の一部は第15回セメント協会研究奨励金の補助を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案），コンクリートライブラリー第94号，1999。
- 2) 出雲健司，名和豊春，大沼博志：異なる温度環境下での混和材で置換したモルタルの収縮について，第56回セメント技術大会講演要旨，pp.86-87，2002。
- 3) 宮澤伸吾，松村仁夫：低発熱セメントを用いたコンクリートの収縮，コンクリート工学年次論文報告集，第19号，第1巻，pp.739-744，1997。
- 4) 松永篤，米田俊一，竹田宣典，十河茂幸：自己収縮特性の異なる混和材を用いたコンクリートのひび割れ抵抗性，コンクリート工学年次論文報告集，第18号，第1巻，pp.1287-1292，1996。
- 5) 上野敦，鈴木祥哲，国府勝郎，宇治公隆：高流動コ

- ンクリートにおける粉体特性が流動性および乾燥収縮性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, 第23号, 第2巻, pp. 991-996, 2001.
- 6) 安田正雪, 阿部道彦, 飛坂基夫, 荒金直樹: フライアッシュコンクリートの収縮性状とひび割れに関する一実験, コンクリート工学年次論文報告集, 第20号, 第2巻, pp. 655-660, 1998.
 - 7) 深川正浩, 中村成春, 梶田桂寛, 阿部道彦: 分級フライアッシュを使用した高強度コンクリートの力学特性および耐久性, コンクリート工学年次論文報告集, 第19号, 第1巻, pp. 205-210, 1997.
 - 8) 田澤栄一, 宮澤伸吾: コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究, 土木学会論文集, No. 571/V-36, pp. 211-219, 1997.
 - 9) 阪田憲次, 椿龍哉, 井上正一, 綾野克紀: 高強度域を考慮した乾燥収縮ひずみおよびクリープ予測式の提案, 土木学会論文集, No. 690/V-53, pp. 1-19, 2001.
 - 10) 下村匠, 福留和人, 前川宏一: 微視的機構モデルによるコンクリートの乾燥収縮挙動の解析, 土木学会論文集, No. 514/V-27, pp. 41-53, 1995.
 - 11) 下村匠, 前川宏一: 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会論文集, No. 520/V-28, pp. 35-45, 1995.
 - 12) 石田哲也, Rajesh P. CHAUBE, 岸利治, 前川宏一: 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.
 - 13) 大下英吉, 濱中隆, 渡邊智紀: クリープ変形としてとらえた自己収縮モデルの構築とその適用性評価, 土木学会論文集, No. 641/V-46, pp. 53-66, 2000.
 - 14) 出雲健司, 竹部公章, 名和豊春, 大沼博志: 異なる温度環境下のモルタルの自己収縮と乾燥収縮について, セメント・コンクリート論文集, No. 55, pp. 211-217, 2001.
 - 15) (社) 日本コンクリート工学協会: 自己収縮研究委員会, 1996.
 - 16) 城安市, 吉田智則, 志澤三明: セメントの初期硬化収縮に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第15号, 第1巻, pp. 537-542, 1993.
 - 17) 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.
 - 18) 名和豊春, 出雲健司, 矢野めぐみ, 湯浅昇: 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.
 - 19) Shehata, M. H., Thomas, M. D. A., and Bleszynski, R. F.: The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes, *Cement and Concrete Research* 29, pp. 1915-1920, 1999.
 - 20) 出雲健司, 矢野めぐみ, 名和豊春, 大沼博志: 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的性質について, セメント・コンクリート論文集, No. 55, pp. 176-181, 2001.

(2002. 11. 26 受付)

SHRINKAGE STRAIN OF MORTAR USING FLY ASH UNDER TWO DIFFERENT TEMPERATURE

Kenji IZUMO and Toyoharu NAWA

Autogenous and drying shrinkage of mortar using fly ash were investigated in this paper. The water cement ratio was set 25% and 45%, and the rate of fly ash of these mix proportion was changed. The specimens were cured at the temperature of 10°C or 20°C, and 57±5% of relative humidity. When the rate of fly ash was gathered, autogenous and drying shrinkage strain decreased. However, compared with the mortar of only cement, the strain did not necessarily decrease. It appears that the factor of autogenous and drying shrinkage are not only the capillary tube tension and hydration action but also the adsorption and desorption of inner water of pore. When the rate of fly ash was gathered, free water increases in pore. Therefore, since change of the chemistry potential energy by hydration action and diffusion of water is decreased, autogenous and drying shrinkage strain is decreased.