

論文 低水セメント比時のシリカフュームを混和したセメント硬化体の収縮挙動に関する基礎研究

丸山 一平*1・寺本 篤史*2

要旨: 水結合材比 0.15 のセメントペーストを作製し、20°C一定と 65°Cまでの初期高温履歴を与え、相対湿度、線膨張係数、ヤング率、自由水、水和収縮等を測定した。その結果、高温履歴を経た場合には水和に寄与する水分量が低下する傾向が示された。相対湿度に関しては、20°C一定の場合は材齢 100 日までに継続的な湿度の低下が確認され、最終的に高温履歴を経たものよりも低くなった。しかし、高温履歴の供試体では自己収縮が 20°C一定のものより 1.5 倍ほど大きくなっており、相対湿度のみからセメント硬化体の収縮を説明することが難しいことがあきらかになった。

キーワード: 超高強度セメントペースト、自己収縮、線膨張係数、高温履歴、相対湿度

1. はじめに

近年、高層建築の需要は増加傾向にあり、既に 150MPa を超える超高強度コンクリート (UHSC) を用いた施工例も報告されている。内部構造の緻密さから高耐久性能をも期待できる UHSC は建築物の長寿命化の面からも今後需要が増大することが予想される。

一方で、低水結合材比の UHSC は単位セメント量が大きく、水和発熱に起因した初期高温履歴を生ずるとともに、低水セメント比に起因する自己収縮を生じることが知られている。これらの物性は、部材間の外部拘束や内部の鉄筋によってひび割れを誘発する可能性があり、高耐久性を期待する UHSC において問題となることが懸念される。

ひび割れの原因となる収縮応力を適切に評価するためには、まず、自己収縮の評価が重要である。一般に、自己収縮ひずみの算定は、全ひずみから温度ひずみを差し引くことで行なわれるが、この成分分離には線膨張係数の測定が不可欠である。

超高強度コンクリートの自己収縮に関わる研究では、シリカフュームの高温時での反応活性が指摘されている¹⁾にも拘らず、自己収縮の温度依存性、高温履歴下における UHSC の線膨張係数に関する検討は実施されておらず、収縮の予測を可能とするデータが十分ではない。

本研究では、シリカフュームをプレミックスした結合材による超高強度コンクリートの自己収縮のメカニズムを考察する目的で、水結合材比 0.15 のセメントペーストに実部材を想定した温度履歴²⁾を強制的に与え、ひずみ、線膨張係数、内部相対湿度、ヤング率、自由水量等の測定を行い、硬化体中の空隙構造と水分挙動に着目して超低水セメント比領域のセメントペースト硬化体の自己収縮挙動について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び調査

本実験で使用したセメントは、低熱ポルトランドセメントにシリカフュームをプレミックスしたセメント (シリカフューム置換率: 10%, 密度: 3.08g/cm³, ブレーン値: 5600cm²/g) である。ベースセメントの低熱ポルトランドセメントの鉱物組成は C₃S: 29.1%, C₂S: 50.1%, C₃A: 4.3%, C₄AF: 9.6%, ブレーン値は 3600cm²/g, 密度は 3.22g/cm³ であり、シリカフュームは、SiO₂ 含有量 95%, 比表面積 17.1m²/g, 密度 2.24g/cm³ である。混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤及び消泡剤を使用し、それぞれ水結合材比 0.15 のセメントペーストにはセメント質量に対して 1% 及び 0.2% を混合した。練混ぜにはモルタルミキサを使用し、混和剤をあらかじめ混入した水を投入後 3 分練り混ぜし、掻き落としの後、さらに 2 分練り混ぜた。材料、練混ぜ環境はともに 20°C である。

2.2 線膨張係数の測定

(1) 供試体寸法及び測定装置

若材齢における線膨張係数測定では、自己収縮が同時に進行するため、測定時間を極力短くする必要がある。しかし、測定時に生じる急激な温度変化は供試体内に温度分布および応力分布を発生させるため、適切な温度ひずみを計測できない。そこで本研究では、供試体内の温度分布を極力小さくする目的で線膨張係数測定用供試体の寸法を 10×60×370mm とした。試験体厚さは、厚さ方向における温度分布が本装置によって 0.2°C 以内に収まるように定めた。供試体は各条件につき 1 体作製した。また、供試体中央部と端部に熱電対を設置して温度履歴を測定するとともに、変形をレーザー変位計 (精度 1/2000mm) によって測定した。本研究で用いた測定装置を図-1 に示す。型枠には熱伝導性に優れた銅板を用い、凹部には供試体との摩擦を減らすためテフロンシートを貼り付けた。その上にポリエステルフィルムで封緘した供試体を設置し、銅板型枠内に温度制御を行った水を流すことで供試体の温度制御を行った。銅板型枠は厚さ 50mm の断熱材で覆い、外部との熱交換を極力少なくした。

*1 名古屋大学大学院 環境学研究科准教授 博士 (工学) (正会員)

*2 名古屋大学大学院 博士課程前期 (正会員)

(2) 線膨張係数算出方法

線膨張係数は、温度変化量と温度ひずみから最小2乗法で回帰して求めた。本研究では20°C一定条件（以下20°C条件）と最高温度65°Cの模擬水和熱条件（以下65°C条件）の2種類のペースとなる温度履歴に、20°C条件では4時間おき、65°C条件では所定材齢（5,10,16,21,26,31,38,53,68,88,125,131時間）において、Step1)+5°Cの温度上昇、Step2)-5°Cの温度降下（もとの温度）、Step3)-5°Cの温度降下、Step4)+5°Cの温度上昇からなる4ステップの温度制御を与えた。昇温・降温速度は、0.2°C/minである。

水結合材比0.15の領域の硬化体は若材齢で急激に自己収縮が進行するため、若材齢において温度ひずみのみを取り出すことができない。図-2に水結合材比=0.15、20°C条件における測定結果の一部を示す。図-2上図は材齢10hで自己収縮の影響が顕著に現れた場合、図-2下図は材齢133時間で、自己収縮の影響が比較的小さい場合である。本研究では、自己収縮はStep1とStep2の区間、Step3とStep4の区間でそれぞれ同様の傾きで線形に進行すると仮定し、昇温過程と降温過程（例えばStep1とStep2）の平均を取ることで自己収縮の影響をキャンセルし、線膨張係数を算出した。すなわち、Step1,2における単位時間あたりの自己収縮ひずみ増加量を a (μ /min)と仮定した場合、Step1での全ひずみ量

$$\varepsilon_{1all} \text{ は} \quad \varepsilon_{1all} = \alpha \Delta T_1 + at_1 \quad (1)$$

$$\text{同様に、Step2での全ひずみ量} \varepsilon_{2all} \text{ は} \quad \varepsilon_{2all} = \alpha \Delta T_2 + at_2 \quad (2)$$

ここに α ：該当区間における線膨張係数 (μ /°C)、 $\Delta T_1, \Delta T_2$ ：Step1, Step2における温度変化量 (°C)、 t_1, t_2 ：Step1, Step2の測定時間 (min)、であり、 $\Delta T_1=5$ (°C)、 $\Delta T_2=-5$ (°C)、 $t_1=t_2=25$ (min)、さらに昇温・降温速度が0.2°C/min一定であることを考慮すると、式(1)、式(2)より自己収縮ひずみの項を消去でき、線膨張係数 α は

$$\alpha = \frac{\varepsilon_{1all} + \varepsilon_{2all}}{2\Delta T} \quad (3)$$

と表わされ、Step1及びStep2で得られる温度変化量と温度ひずみの回帰式を平均すれば線膨張係数を求めることができる。

また、本研究では、データのばらつきが少なくなるよう配慮し、 $\pm 5^\circ\text{C}$ の温度変化の範囲内で温度変化の端点0.5°C分を削除し、線形性の高い部分の値をもとに線形回帰を行った。

2.3 自己収縮ひずみの測定

高温履歴を経たセメントペーストの収縮挙動を長期間測定する目的で、上述の線膨張係数測定実験と同種のセメントを用い、水結合材比0.15のセメントペースト供試体を作製した。自己収縮ひずみの測定は、自己収縮研究委員会の提案する自己収縮ひずみ測定方法⁷⁾を参考とし、供試体寸法を100×100×400 (mm)、型枠による自由変形の拘束を防ぐため、型枠底面にテフロンシート（厚さ0.3mm）、両端にスチレンボード（厚さ1mm）、更に型枠とセメントペーストの接触を防ぐ目的で、型枠底面・側面をポリエステルフィルム（厚さ0.1mm）で覆った。測定は埋込型ひずみ計（剛性：39N/mm²）によって行い、温度履歴の計測を同時に行ってひ

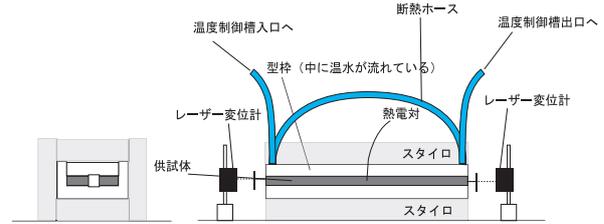


図-1 線膨張係数測定装置の概要

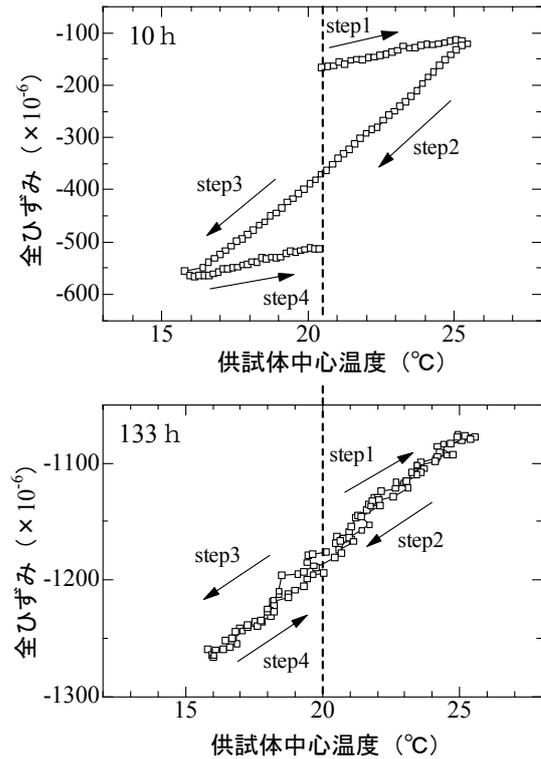


図-2 供試体中心温度と全ひずみの関係
(上：自己収縮が大きい場合、下：自己収縮が小さい場合)

ずみ計の温度依存性を補正した。打ちみ、締固め後は仕上げ面をポリエステルフィルムで覆い、アルミ粘着テープを用いて完全に封緘した。20°C供試体はセメントの水和発熱によって初期に30°C程度まで温度が上昇した点において、他の供試体と温度履歴に差異が生じているが、本論文ではその影響が小さいものとして議論を進める。

2.4 相対湿度の測定

10×60×90mmのプラスチック容器にセメントペーストを打設し、アルミ粘着テープで密閉した後、各温度履歴を与えた。所定材齢(12h,30h,36h,3d,7d)において各温度制御チャンバーから取り出し、20°Cの部屋で恒温になるまで空冷した後、封緘したままハンマーで20mm以下の小片に粉砕し、容積可変のアルミ製袋に密封した。袋内の相対湿度を一定にする目的で袋内の空気を攪拌し30分間放置した後、温湿度計によって袋内の温度及び相対湿度を測定した。事前の検討から、袋内の相対湿度は30分でほぼ平衡状態に達することが分かっている。本検討は、平尾らの研究をもとにしたものである³⁾。また、測定した湿度計は20°Cにおいて $\pm 3\%$

の精度を有する。

2.5 自由水量及び吸着水量の測定

セメントペースト硬化体の各材齢における蒸発可能水分量を測定した。供試体は約 $5 \times 50 \times 80 \text{mm}$ の大きさで、テフロン製の容器に入れ、アルミ粘着テープにより封緘したものをそれぞれ、 20°C 一定および 65°C 条件で養生した。所定の材齢に封緘したままハンマーで試料を粉碎し、ろつばに移して質量を測定し、すぐに 105°C の炉に入れた。24時間 105°C 乾燥後の質量を測定し、その質量差を蒸発可能水として定義した。前実験においては、粉碎時の蒸発の影響の方が自由水量の測定精度に影響を及ぼしており、水和による自由水量低減には大きな影響はみられなかった。また、 105°C 乾燥させた供試体を 20°C 、 $50\% \text{RH}$ と $15\% \text{RH}$ において平衡させ、それぞれの水分量を測定した。

2.6 水和収縮の測定

20°C 一定条件下において、練混ぜ直後から水和収縮を測定した。低水セメント比であることから水分の浸透速度が小さく、供試体の寸法依存性が生じることが懸念されたため、自己収縮研究委員会報告書にある実験結果⁹⁾を参考に厚さ 3mm 毎に濾紙を挟んだ供試体を作成し、自己収縮研究委員会が提案した水和収縮量の測定方法⁹⁾により測定をおこなった。

2.7 極若材齢におけるヤング率の測定

超音波の伝播速度とヤング率には相関があるといわれている⁴⁾。ヤング率の発現過程を明らかにすることを目的に、超音波伝播速度によるヤング率の推定を行った。超音波速度は 50KHz であり、測定は供試体寸法 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ の供試体で両端面において測定をおこなった。キャリブレーションのために、同一寸法の供試体を用いて載荷試験を行い、圧縮状態におけるヤング率の測定も併せて行った。

3. 実験結果

図-3 (a) (b) (c) (d) (e) に供試体温度履歴、線膨張係数、全ひずみと自己収縮ひずみ、相対湿度、ヤング率の経時変化を示す。水結合材比 0.15 の各物性について、線膨張係数及び相対湿度は別バッチの測定で得られたものであるが、両者の収縮特性、強度特性に差異がないことが確かめられている。

3.1 線膨張係数

線膨張係数は、測定開始直後から硬化に伴い、材齢12時間までに急激な減少が見られる。この現象についてはすでに若材齢時の線膨張係数の特徴的な挙動として数例報告されている^{5) 6) 7)}。

20°C 条件では、その後は漸増傾向を示したが、 65°C 条件では供試体温度が 40°C 前後に達する材齢21hから急激な上昇が確認され、材齢2日以降は、ほぼ一定値となった。

3.2 自己収縮ひずみ

図-3 (a) の温度履歴と図-3 (b) の線膨張係数を用いて温度ひずみを算出し、これを実験により取得した図-3 (c) に示す全ひずみから差し引くことで自己収縮ひずみを得た。算定結果を図-3 (c) の全ひずみとともに示す。

全ひずみでは、 65°C 条件供試体で温度上昇に伴い材齢1日前後に若干の膨張域が見られるが、その膨張はわずかである。これは、温度ひずみによる膨張と自己収縮の進行がバランスし、若干の膨

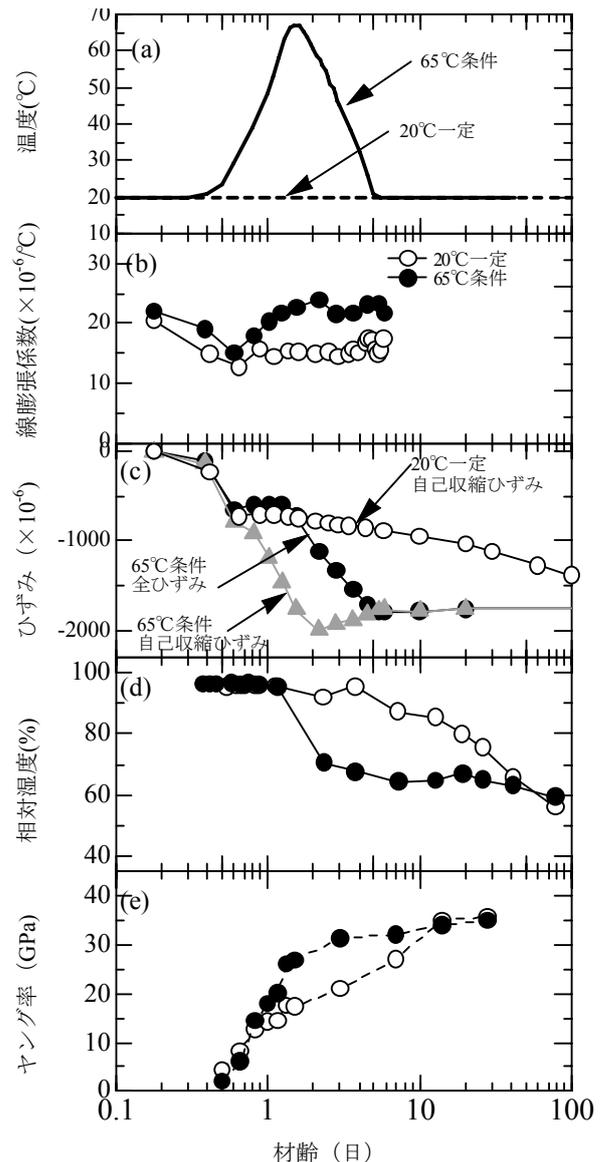


図-3 水結合材比 0.15 のセメントペーストの時間依存挙動：
(a) 供試体の温度履歴、(b) 線膨張係数、
(c) 全ひずみと自己収縮ひずみ、(d) 相対湿度、(e) ヤング率

張側になったことを意味する。そのため、温度ひずみをキャンセルすることによって算出された自己収縮ひずみに着目すると、温度上昇とともに急激に収縮が進行していることがわかる。この収縮現象は材齢2日前後にピークを迎え、その後は若干の膨張傾向を示し、材齢7日以降はほぼ一定値となった。この材齢2日以降の 65°C 条件供試体の膨張傾向は、コンクリート供試体において橋田らの研究でも確認されたものである⁸⁾。

本件に関しては、温度一定状態のセメントペースト供試体において相対湿度が上昇し、自己収縮ひずみが膨張長に転ずる実験結果⁹⁾に対して、石田らが細孔内凝縮水の再配分によるものと仮説をたて、数値計算によりその挙動の評価を試みた例があるが¹⁰⁾、メカニズムについては未だ明らかにはなっていない。

また、 20°C 条件供試体は材齢12時間以降に緩やかな収縮挙動を継続し、材齢100日時点であっても、収縮が継続していた。

3.3 相対湿度

図-3 (d) に示されるように、水和に伴って内部乾燥が進行し、自由水の化学ポテンシャル低下が、平衡相対湿度の低下という形で実測された。65°C条件と20°C条件を比較した場合、65°C条件では、温度上昇過程の材齢約1日から水和の促進とともに早期に相対湿度の低下が確認され、一方20°C条件では、材齢6日から相対湿度の減少が開始し、その後も緩やかに降下し、材齢100日まで減少が継続している。また、材齢50日前後で、65°C条件の値を下回った。従来、水和による相対湿度の低下は、内部水分の化学ポテンシャルの低下による水和の停滞¹¹⁾によって下限値が存在するとされ、その値が75%程度であると指摘されていたが¹²⁾、本研究の範囲では未だその低下が進行している。

3.4 ヤング率

図-3 (e) にヤング率の経時変化を示す。材齢28日時点において、ヤング率に両者の大きな差異は無かった。

材齢12時間から168時間で実際に測定したヤング率と同時刻に測定した超音波の伝播速度の関係を図-4に示す。伝播速度を横軸、ヤング率を縦軸にとり指数関数で近似したところ、両者には高い相関がみられ、極初期の硬化過程を評価しうることが確認された。ここで得られた近似式と材齢12時間以前に測定した伝播速度から、極若材齢におけるヤング率の推定が可能であると考えられる。

3.5 セメント硬化体中の水分量

図-5に各材齢で測定した蒸発可能水分量(封緘状態から105°Cで蒸発しうる水分量)の経時変化を示す。ここでの自由水は105°C乾燥によるものであり、水和生成物からの水分逸散が若干ながら含まれていることに留意する必要がある。

本研究では、各材齢での蒸発可能水分量の他に、供試体を1度105°C乾燥を行った後に15%RH、50%RHにおいて平衡となった時点の水分量(質量が平衡となった時点、2ヶ月程度の期間デシケータ中に静置した。)を計測した。これは、図-6に示すように、20°C15%RH以下の領域ではC-S-H中の空隙に水分が選択的に吸着し、層間水と大きな相関を有すること(層間水と定義)¹³⁾、20°C50%RH以下の領域の水分はBadmannの吸着等温式¹⁴⁾とケルビン式から4nm以下の空隙が水によって満たされること(ゲル水と定義)を仮定してのものである。

図-5によれば、65°C条件では、高温履歴によって大幅な水和の促進が期待されるにもかかわらず、水分消費は大きく変化せず、材齢5日以降に20°C一定条件とほぼ同等の結果となった。このことは、温度履歴を経た供試体では、20°C一定条件との比較において、相対的に少ない結合水で水和が進行していることを示唆している。

図-7に15%RH以下の吸着水量(層間水に相当)と15%RH以上50%RH以下の吸着水量(ゲル空隙水に相当)の経時変化を示す。実験によれば、層間水は水和の進行とともに増大し、特に65°C条件の場合、材齢24時間から36時間の間で急増した。その差異は材齢28日においても埋められていない。一方、ゲル水と定義した相対湿度15%以上50%以下の水分量は65°C条件で、15%以下と同様に大きく増大している。20°C条件においては、材齢28日では相対湿度15%以下の吸着水分量が、相対湿度15%から50%

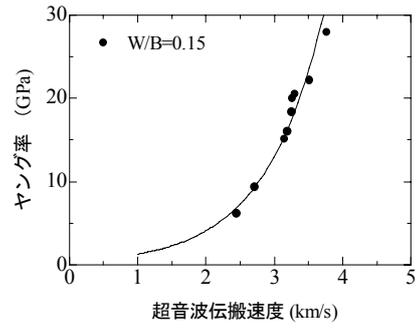


図-4 W/B=0.15のセメントペーストのヤング率と超音波伝搬速度の関係

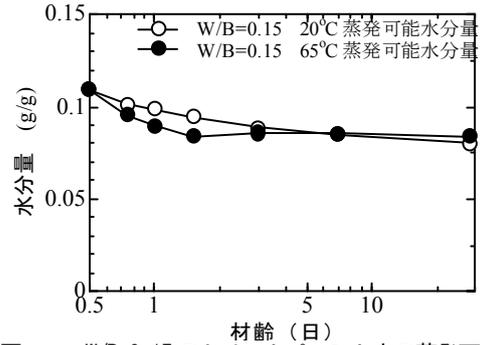


図-5 W/B=0.15のセメントペースト中の蒸発可能水量

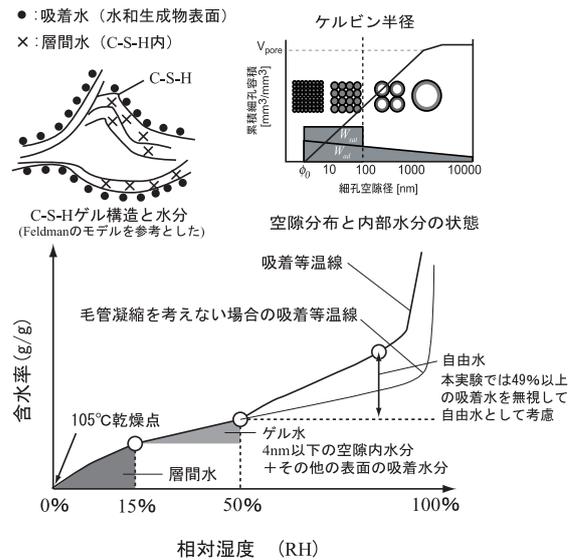


図-6 本研究で仮定した空隙中の水分と平衡含水率の関係

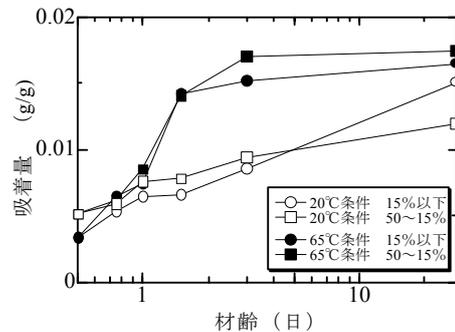


図-7 ゲル空隙水と層間水の経時変化

の吸着水分量よりもおおきくなっている点が特徴的である。

ゲル水と層間水の割合については、65°C条件では一貫してほぼ等しい割合にあるが、20°C条件では、材齢28日において層間水の方が大きくなる傾向を示したことになる。このことは、水和反応の度合いから検証する必要があるが、65°C条件では、より緻密な水和生成物ができている可能性を示唆している。

4. 自己収縮ひずみに関する考察

相対湿度と自己収縮ひずみの関係をプロットしたものを図-8に示す。20°C条件、65°C条件の供試体はともに相対湿度の低下が開始する前の極若材齢に大きく収縮が進行した（以後、この勾配を第1勾配と呼ぶ）。

その後、相対湿度-自己収縮関係において、屈折点を迎え、異なる勾配で自己収縮が相対湿度の低下にもなって進行した（以後、この勾配を第2勾配と呼ぶ）。この屈折点を迎える材齢は、20°C条件と65°C条件で大きく異なり、65°C条件の供試体では、最高温度65°Cを迎えた直後の材齢33時間であり、20°C一定状況下では、材齢136時間であった。高温履歴を受けた場合には、自己収縮が極小値を迎えた時点（材齢48時間）からセメント硬化体は膨張傾向を示すが、その間も相対湿度は低下しつづけている。このことは、セメント硬化体の収縮、膨張が水の化学ポテンシャルからだけでは説明できない可能性があることを示唆しており、石田らの仮説¹⁰と実際の挙動は異なる傾向を示している。これらの点については、内部の水分状態の把握とともに今後の課題となろう。

20°C条件の供試体は、材齢136時間以降に屈折点を迎えるが、この時点の自己収縮ひずみは、65°C条件の供試体の自己収縮ひずみと比較してかなり小さい。これは、第1勾配の屈曲点までのひずみ量、及び第2勾配において示される相対湿度変化に対する収縮量の違いの二通りの要因によって説明される。前者は、水和反応による収縮起動力の増大とヤング率による抵抗のバランスによって決定される。この観点から、図-9に水和収縮、ヤング率、および自己収縮を同時に示した。ここに示されるように水和収縮は練混ぜ直後から緩やかに進んでおり、自己収縮の傾向とは異なる傾向を示している。自己収縮が急激に進んだ期間はヤング率にして10GPa程度までの間である。水和収縮の勾配は材齢の対数に対してほぼ直線的に推移しているにもかかわらず、ヤング率に

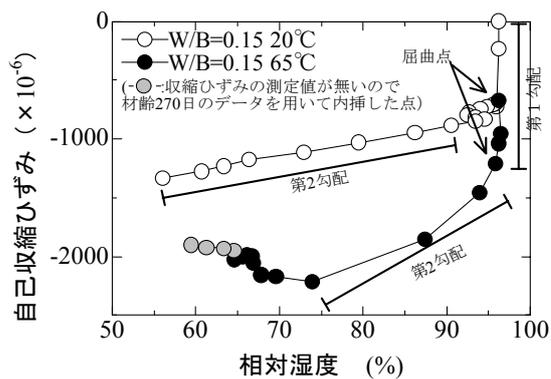


図-8 温度履歴がW/B=0.15のセメント硬化体の相対湿度と自己収縮ひずみの関係に及ぼす影響

しては10GPaまでの区間で、特に水和初期に関しては立ち上がりが鈍い。このことは、水和の進行にかかわらずセメント粒子間の架橋があまり進行していない可能性が高い。また、この区間は図-3、図-8に示されるように湿度の低下はほとんど確認できていない。このことから、初期の大きな自己収縮中は、水和収縮によってセメントペースト内部に空間ができ、メニスカスが生成しようとされるが、メニスカス生成にもなって生じる液体の負圧に硬化体が耐えられず、硬化体がくずれ結果として水和収縮による体積変化がマクロの収縮に反映される形となっているものと推察される。

5. 結論

低熱ポルトランドセメントを基材に、混和材としてシリカフェームを用いた水結合材比0.15のセメントペーストに、20°C一定条件下と最高温度65°Cの初期温度履歴を与えたものに関して諸物性の測定を行い、自己収縮メカニズムに関する考察を行った。以下が本研究の結論である。

- (1) シリカフェームをプレミックスしたセメントペースト供試体に関して、実部材を模擬した最高温度65°Cの温度履歴を与えた場合、自己収縮ひずみは材齢2ヶ月程度で20°C一定のものより約1.5倍の大きさを示した。この大きさは、比較的相対湿度の高い期間における初期の自己収縮の大きさによって

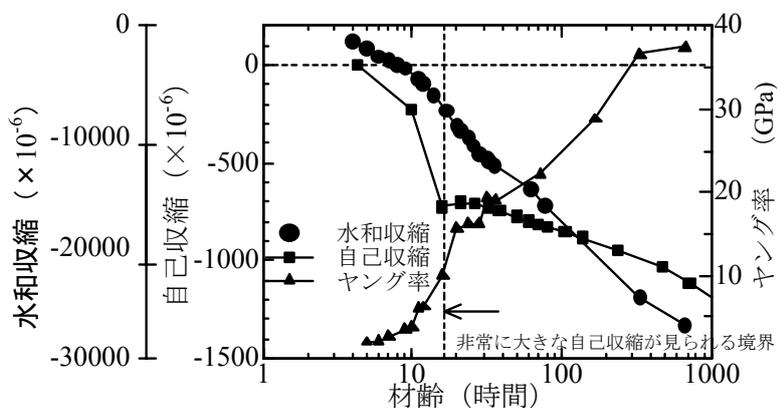


図-9 水和収縮量、自己収縮ひずみ、ヤング率の関係

律則される傾向がある。

- (2) 従来、20°C、75%RH と指摘されていた水和による平衡相対湿度の低下はそれよりも小さくなることが実験的に明らかになった。
- (3) 相対湿度と自己収縮ひずみの関係をプロットした結果、相対湿度に対して自己収縮ひずみは屈折点をもつ二つの勾配によって示された。第1勾配は98%RH程度までの間におこる初期の大きな自己収縮ひずみであり、第2勾配は相対湿度の低下とともに経時的に自己収縮ひずみを増大させるものであった。
- (4) 20°C一定条件下のセメントペースト供試体の平衡相対湿度は、温度履歴を経たセメント硬化体の相対湿度を下回る結果となった。このことは、水和によって生成されるゲル空隙の緻密化に伴う自由水の増大によって説明されることが明らかになった。
- (5) 初期の98%RH程度までの急激な自己収縮は、ヤング率、相対湿度、水和収縮の経時変化から、メニスカス生成にもなっている液体の負圧に硬化体が耐えられず、硬化体がくずれられる結果、水和収縮による体積変化がマクロの収縮に反映される形となっているものと推察された。

謝辞：本研究の一部は、平成18-20年度文部科学省科学研究費若手研究A(代表 丸山一平、課題番号：18686045)の補助を受け実施した。関係各位に記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 菅又匠ほか：セメント-シリカフェーム系結合材の水和反応と強度発現の関係に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1287-1292，2004
- 2) 鈴木雅博ほか：超高強度コンクリートの自己応力に及ぼす温度履歴の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.59，pp.375-382，2005
- 3) 平尾宙ほか：硬化セメントペーストの湿度および硬化体構造の変化と自己収縮，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，pp.705-710，1996
- 4) G. Ye, et. al., : Study on the Development of the Microstructure in Cement-Based Materials by Means of Numerical Simulation and Ultrasonic Pulse Velocity Measurement, Cement and Concrete Composites, Vol. 26, Issue 5, pp.491-497, 2004
- 5) 楊揚ほか：硬化過程にある高強度コンクリートの線膨張係数測定方法の一提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.961-966，2000
- 6) 丁海文ほか：高強度コンクリートの線膨張係数に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.955-960，2000
- 7) 小澤満津雄ほか：非接触変位計による若材齢コンクリートの線膨張係数の計測，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.1099-1104，2001
- 8) 橋田浩ほか：初期高温履歴を受ける高強度コンクリート構造体の自己収縮応力の算定法に関する検討，日本建築学会構造系論文集，No.537，pp.7-12，2000
- 9) 太星鎬ほか：各種養生温度条件下のセメント硬化体の自己収縮及び組織構造の経時変化，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No. 2，pp.793-798，2001
- 10) 石田哲也ほか：温湿度履歴に関するセメント硬化体中の水分平衡・移動モデルの高度化，土木学会論文集，No.795/V-68，pp.39-54，2005.8
- 11) 小野吉雄：クリンカー鉱物の水和活性と平衡水蒸気圧，セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.24-29，1990
- 12) Jensen, O. M.: Thermodynamic Limitation of Self-Desiccation, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.1, pp.157-164, 1995
- 13) J. F. Young, and W. Hansen: Volume relationships for C-S-H formation based on Hydration stoichiometries, Material Research Society Symposium Proceedings, Vol. 85, pp.313-322(1987)
- 14) Badmann, R., Stockhausen, N., and Setzer, M. J.: The Statistical Thickness and the Chemical Potential of Adsorbed Water Films, J. Col. Int. Sci., Vol.82, No.2, pp.534-542, Aug. 1981