

論文 周囲の温湿度条件が高強度コンクリートの収縮挙動に及ぼす影響

岩城 一郎^{*1}・木村 悠一郎^{*2}・三浦 尚^{*3}

要旨：周囲の温湿度条件が高強度コンクリートの自己収縮及び乾燥収縮に起因した収縮挙動に及ぼす影響を究明するため、温度と相対湿度の組合せ、並びに乾燥開始材齢を変化させた高強度コンクリート及び普通強度コンクリート供試体の長さ変化率を測定し、両者の収縮挙動を比較検討した。また、同一供試体により質量変化率と動弾性係数の経時変化を測定することにより、これらの要因と収縮挙動との関連性についても検討を行った。その結果、高強度コンクリートの収縮挙動は温湿度条件に大きく依存し、その原因は乾燥開始時の組織の緻密性及び温湿度条件の違いによる水分逸散性と密接に関連していることが示唆された。

キーワード：高強度コンクリート、自己収縮、乾燥収縮、長さ変化率、動弾性係数

1. はじめに

高強度コンクリートの普及に伴い、国内外でその物性について精力的な研究が行われており、その収縮挙動や収縮ひび割れ性状に関しては、普通強度コンクリートと比較し、自己収縮が過大となり¹⁾、これに乾燥収縮の影響が加わると耐久性上有害な収縮ひび割れが発生することが指摘されている^{2), 3)}。高強度コンクリートの自己収縮及び乾燥収縮に起因した収縮挙動に関する研究は、これまで主として使用材料（セメント及び混和材料の種類）や配合（水セメント比や混和材の置換率）による影響が調べられており、その研究成果は多くの報告書^{1), 4), 5)}にまとめられている。一方、周囲の温湿度条件がコンクリートの収縮挙動に及ぼす影響に関しては、既往の実験結果を整理した研究成果⁶⁾を参照すると、標準的な条件（例えば温度 20℃、相対湿度 60%）にデータが集中している傾向にあり、それ以外の温湿度条件下での高強度コンクリートの収縮挙動については十分に解明されているとは言い難い。最近の研究において、宮澤ら⁷⁾は温度を 20℃一定とし、相対湿度が高強度コンクリートの収縮挙動に及ぼす影響を詳細に検討

している。一方、出雲ら⁸⁾は相対湿度を 57%±5%に管理し、10℃と 20℃での高強度モルタルの収縮挙動を検討している。しかしながら、高強度コンクリートに対するこれらの研究データの蓄積はまだ十分であるとは言えず、特に温度と湿度の相互作用の結果としてもたらされるセメント硬化体の水分逸散性や水和の進行に伴う組織の緻密性といった物性と収縮挙動との関係について、詳細に検討した例は少ないと思われる。

そこで本研究では、我が国で想定される気象条件に基づき、4種類の温湿度条件を選定し、高強度コンクリートと普通強度コンクリートを対象に、これらの条件と乾燥開始材齢が収縮挙動に及ぼす影響を比較検討することとした。さらに、同一供試体から質量変化率と動弾性係数の経時変化を測定し、温湿度条件や乾燥開始材齢に応じた水分の逸散性、水和の進行による組織の緻密化に伴う剛性の発現、あるいは乾燥による微細ひび割れの発生に伴う剛性の低下といった傾向を把握することにより、これらの物性と収縮挙動との関連性について検討を行うこととした。

*1 東北大学講師 工学研究科土木工学専攻 博（工）（正会員）

*2 東北大学大学院生 工学研究科土木工学専攻 工学士

*3 東北大学教授 工学研究科土木工学専攻 工博（正会員）

表-1 セメントの試験成績結果

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結		圧縮強さ(N/mm ²)			MgO (%)	SO ₃ (%)	強熱減量 (%)	全アルカリ (%)	Cl ⁻ (%)
		始発(h-m)	終結(h-m)	3日	7日	28日					
3.16	3270	2-12	3-26	28.5	44.6	61.5	1.35	2.14	1.68	0.61	0.006

表-2 配合表

記号	粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m ³)						
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤		
								SP	AE-1	AE-2
W/C25	20	25	48	170	680	711	844	8.84	0.024	
W/C60	20	60	42	170	283	759	1149			0.071

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。表-1にセメントの試験成績結果を示す。細骨材は山砂（宮城県大和町産，表乾密度 2.60g/cm³，粗粒率 2.82，吸水率 2.05%），粗骨材は碎石（宮城県丸森町産，表乾密度 2.85g/cm³，吸水率 0.98%）を使用した。本研究で扱う高強度コンクリートは，自己充てん性を有するものを対象としているため，高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸エーテル系）を使用し，高流動性（スランプフロー値 650±50mm）を付与した。さらに，高強度コンクリート，普通強度コンクリート共に十分な耐凍害性を有するよう，タイプの異なる AE 剤を添加し，空気量を調整した（空気量 5±1%）。

配合表を表-2に示す。W/C25 は，水セメント比 25%の高強度コンクリートである。一方，W/C60 は水セメント比 60%の普通強度コンクリートである。単位水量は両コンクリートとも 170kg/m³で一定とした。細骨材率はそれぞれ所定のフレッシュ性状が得られるよう調整した。

2.2 実験方法

収縮挙動を測定するための供試体は 10×10×40cm の角柱供試体である。供試体は各条件に対し 3 本作製した。供試体の長さ変化は，JIS A 1129-2 2001 に従い，各測定材齢における供試体の両側面に貼り付けたゲージプラグ間の距離をコンタクトストレインゲージにより測定し，次に従い算出した。

$$\varepsilon = \frac{(X_{01} - X_{02}) - (X_{i1} - X_{i2})}{L_0} \quad (1)$$

ここに， ε ：長さ変化率(%)

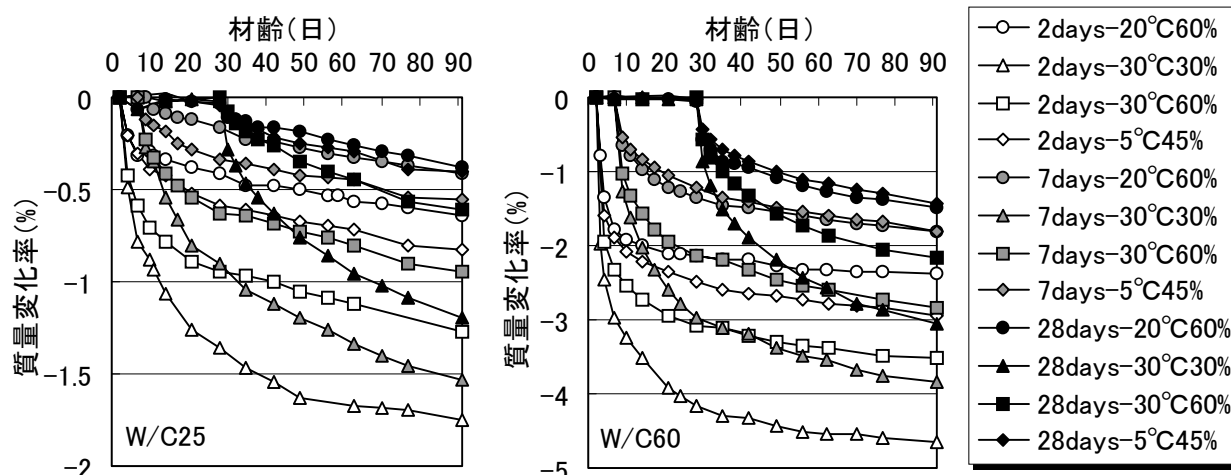
L_0 ：基長

X_{01} , X_{02} ：型枠脱型時における標準尺及び供試体の測定値

X_{i1} , X_{i2} ：各測定材齢 i における標準尺及び供試体の測定値

また同一供試体により，型枠脱型時の質量を基準とした各材齢における供試体の質量変化率を測定すると共に，JIS A 1127-2001 に従い，たわみ振動の一次共鳴振動数より算出される動弾性係数も測定した。

各コンクリートは，20℃恒温室内で打込み，上面を成形した後，直ちにラップフィルムにより封かんし，材齢 2 日で脱型した。乾燥開始材齢は 2 日，7 日，28 日の 3 種類である。乾燥開始材齢 2 日の供試体については脱型後直ちに長さ，質量，動弾性係数を測定し，その後，20℃ 60%RH，30℃30%RH，30℃60%RH，5℃45%RH に保たれた恒温恒湿室（器）に移し，乾燥を開始させた。これらの温湿度条件は，我が国の気象条件を想定したものであり，20℃60%RH と 30℃60%RH は収縮挙動に及ぼす温度の影響を調べるためのものであり，30℃30%RH と 30℃60%RH は相対湿度の影響を調べるためのものである。また，低温下での収縮挙動を調べるため，5℃一定恒温室にも供試体を保管したが，相対湿度については他の条件と直接対応したものではない。他方，材齢 7 日及び 28 日から乾燥さ



図－1 各乾燥条件に対する材齢と質量変化率との関係

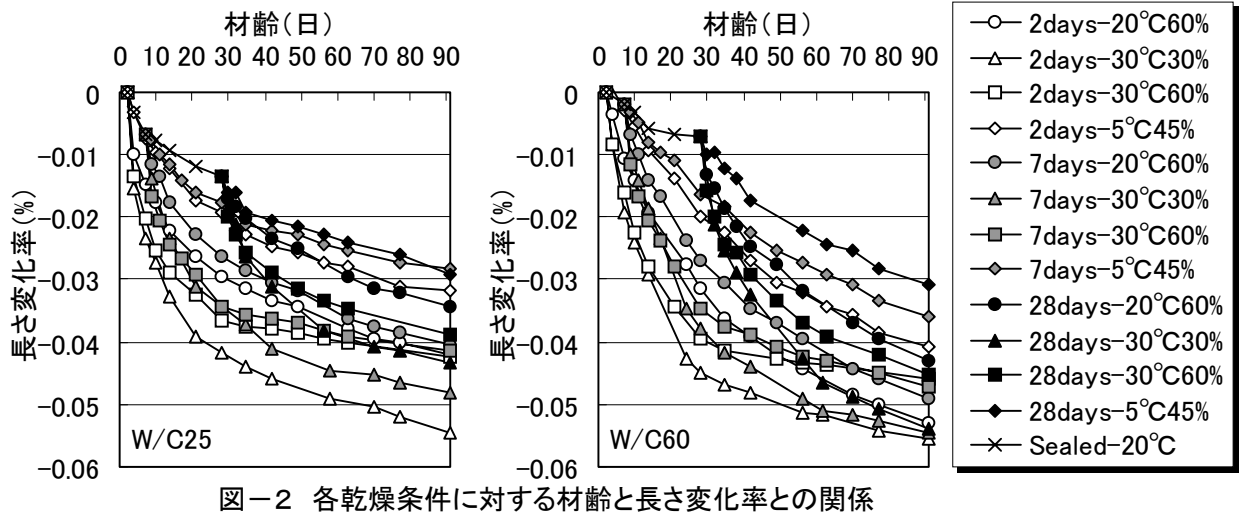
せるものについては、脱型後直ちにラップフィルムで供試体を包み、さらにその上からビニールテープを巻いて供試体を封かんし、乾燥開始材齢に達するまで 20℃恒温室内に保管した。このうち一部の供試体については前述の方法に従い、20℃一定封かん養生下における長さ変化率（自己収縮量）を測定した。なお、本研究では脱型（材齢 2 日）以降の封かん状態も含めた乾燥条件の違いが収縮挙動に及ぼす影響について比較検討することを目的としているため、長さ変化率は脱型時を基点としている。従って、ここでいう自己収縮量とは、脱型後の値であり、凝結始発を基点とする既往の文献¹⁾で定義されているものとは異なる。なお、既往の研究より、本研究と同様の配合を有する高強度コンクリートの脱型（材齢 2 日）以前の自己収縮ひずみは 200-500 μm 程度であると考えられるが、脱型以前の自己収縮ひずみはその測定方法によって大きく異なることが指摘されている⁴⁾。

長さ変化率は、それぞれの恒温器内で測定することが不可能なため、20℃恒温室内で行うこととした。その結果、基点測定時の供試体温度（20℃）と 5℃恒温器あるいは 30℃恒温器から供試体を取り出した時点での供試体温度は明らかに異なるため、この影響を補正する必要がある。本研究では、予備実験により同一配合の供試体の線膨張係数を測定し、これと供試体を恒温器から取り出してから測定するまでの時間と

その間の供試体の温度上昇（降下）量との関係から熱膨張による影響を補正することとした。予備実験の結果、高強度コンクリートと普通強度コンクリートの熱膨張係数の値はそれぞれ $9.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 、 $8.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ であった。一方、各乾燥環境から供試体を取り出し、20℃60%RH 環境下で測定を行う際の相対湿度の違いによる影響については、測定中の供試体の質量変化が無視できる程度であったため、その補正を行う必要はないと判断した。

3. 結果と考察

標準水中養生を行った高強度コンクリートと普通強度コンクリートの材齢 28 日における平均圧縮強度はそれぞれ 74.9MPa、30.3MPa であった。図－1 に高強度コンクリートと普通強度コンクリート（以下、図中ではそれぞれ W/C25、W/C60 と記す）の各乾燥条件（温湿度条件及び乾燥開始材齢）に対する材齢と質量変化率との関係を示す。図より、高強度コンクリートの質量変化率は普通強度コンクリートに比べ明らかに小さいことがわかる。両コンクリートとも同一温湿度条件であれば乾燥開始材齢が早いほど質量変化率は増加しており、これは、早期に乾燥を開始させるほど供試体中に水和によって消費されていない自由水が残存しているためであると考えられる。また、温湿度条件が質量変化率に及ぼす影響に着目すると、その傾向は総じ



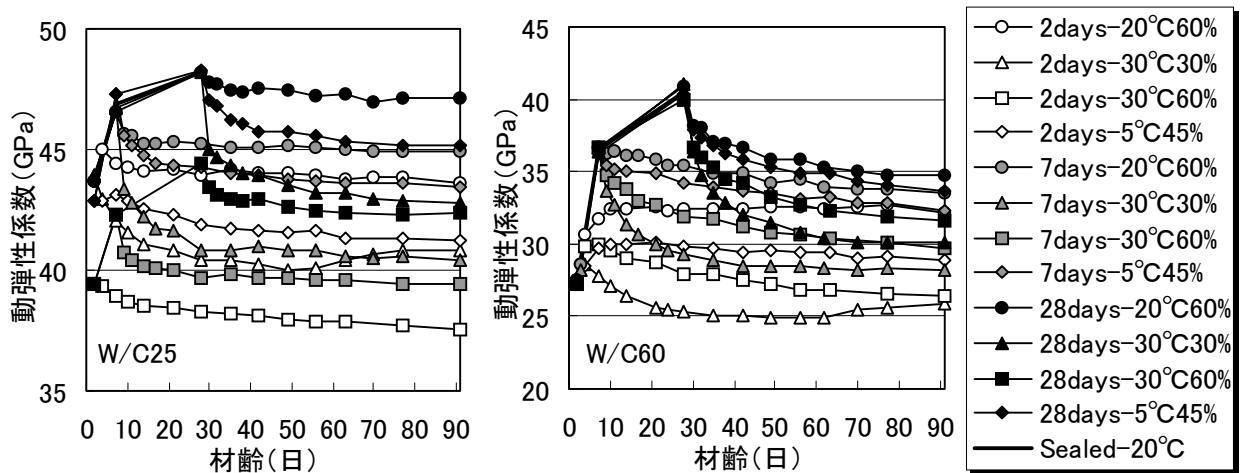
図－2 各乾燥条件に対する材齢と長さ変化率との関係

て $30^{\circ}\text{C}30\%\text{RH} > 30^{\circ}\text{C}60\%\text{RH} > 5^{\circ}\text{C}45\%\text{RH} > 20^{\circ}\text{C}60\%\text{RH}$ の順になっており、温度が同じであれば相対湿度が低い方が、また相対湿度が同じであれば温度が高い方が大きな質量変化率を示している。 $5^{\circ}\text{C}45\%\text{RH}$ と $20^{\circ}\text{C}60\%\text{RH}$ は温度、相対湿度共に異なっているため単純な比較は出来ないが、W/C60 に着目すると、乾燥開始材齢 2 日では $5^{\circ}\text{C}45\%\text{RH} > 20^{\circ}\text{C}60\%\text{RH}$ となっているのに対し、乾燥開始材齢 7 日では両者の関係が逆転している。この理由は、 20°C 環境下では 5°C 環境下に比べ水和が促進するため、水和が十分に進行していない乾燥開始材齢 2 日の場合には、水和による水分消費の影響が卓越し、 5°C に比べセメント硬化体中の自由水量が減少したためであると考えられる。

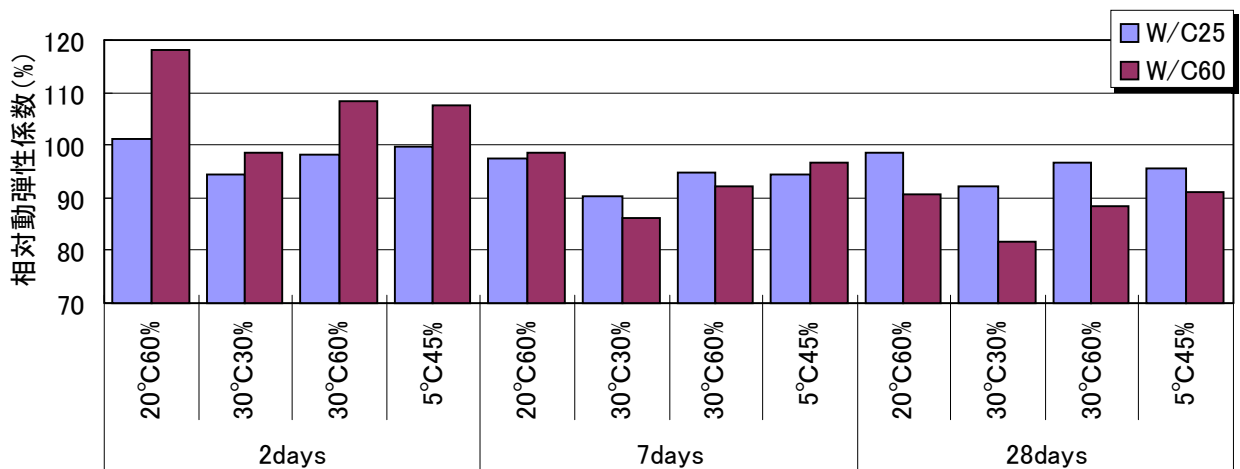
図－2 に各乾燥条件に対する材齢と長さ変化率との関係を示す。図より、高強度コンクリートは普通強度コンクリートに比べ、自己収縮量は大きい、脱型以降の両者の全収縮量に質量変化率で見られたような大きな差は見られない。すなわち高強度コンクリートではより少ない水分逸散量で大きな収縮を引き起こすと言える。乾燥開始材齢の影響に着目すると、標準的な環境 ($20^{\circ}\text{C}60\%\text{RH}$) および低温環境 ($5^{\circ}\text{C}45\%\text{RH}$) では概して乾燥開始材齢が早いほど材齢 91 日における全収縮量も大きくなる傾向を示しているが、高温環境下 ($30^{\circ}\text{C}30\%\text{RH}$, $30^{\circ}\text{C}60\%\text{RH}$) では、早期に乾燥を開始させた場合、次第に収

縮の進行が停滞し、後から乾燥を開始させた場合の収縮挙動に追いつかれる傾向を示した。これは、材齢初期に急速な乾燥を受けたことにより水和に必要な水分が不足し、細孔組織が粗雑化したため、十分な毛細管張力が得られなかったことに起因すると推察される。ただし、 $30^{\circ}\text{C}30\%\text{RH}$ における高強度コンクリートでは、早期に乾燥を開始させたものほど収縮が進行しており、この点については毛細管張力とは別のメカニズムが作用している可能性もあり、今後の研究課題である。温湿度条件が長さ変化率に及ぼす影響に着目すると、その傾向は $30^{\circ}\text{C}30\%\text{RH} > 30^{\circ}\text{C}60\%\text{RH} > 20^{\circ}\text{C}60\%\text{RH} > 5^{\circ}\text{C}45\%\text{RH}$ となっており、温度が高く、相対湿度の低い条件で収縮が顕著に現れる結果となった。ただし、高温下 ($30^{\circ}\text{C}60\%\text{RH}$, $30^{\circ}\text{C}30\%\text{RH}$) では、乾燥開始後しばらくは収縮量に大きな違いは見られず、その後、材齢の経過に伴い、両者の差が徐々に広がる傾向を示した。このことから高温下における乾燥開始直後の収縮挙動は相対湿度にあまり依存しない可能性があると考えられる。この点は今後より詳細に検討する必要がある。一方、低温下 ($5^{\circ}\text{C}45\%\text{RH}$) では、本実験条件中、乾燥開始材齢によらず長さ変化率が最も小さくなっているが、これは、水和の進行が遅く、組織が十分に緻密化していない上、乾燥の程度もそれほど高くないためであると考えられる。

図－3 に各乾燥条件に対する材齢と動弾性係



図－3 各乾燥条件に対する材齢と動弾性係数との関係



図－4 各乾燥条件に対する乾燥開始材齢を基準とした乾燥開始7日後の相対動弾性係数

数との関係を示す。ここで、図中の太線は封かん養生を継続した供試体の動弾性係数の変化を示しており、図より、高強度コンクリートは普通強度コンクリートと比較し、材齢2日までの剛性の発現が顕著であり、その後は緩やかに増加する傾向を示している。また、材齢2日から乾燥を開始させた場合、総じて動弾性係数は多少増加し、その後減少に転じる傾向を示した。ただし、高強度コンクリート（W/C25）を高温下（30°C30%RH 及び 30°C60%RH）で乾燥させた場合、乾燥直後から動弾性係数が減少した。これに対し、材齢7日、28日から乾燥を開始させた場合、全ての条件で乾燥直後から動弾性係数が減少した。これらの傾向は、水和による組織の緻密化に伴う剛性の増加と乾燥による微細なひび割れの発生（組織の弛緩）に伴う剛性の低下の総和であると考えられる。温湿度条件が

動弾性係数に及ぼす影響に着目すると、乾燥後の動弾性係数は 30°C30%RH>30°C60%RH>5°C45%RH>20°C60%RH の順に低下しており、高温下で乾燥に伴う剛性の低下がより顕著に現れる結果となった。また、5°C45%RH が 20°C60%RH に比べ、剛性が低下した理由は、水和の進行が遅く、動弾性係数の増加割合が小さかったためであると考えられる。なお、図－3の左図で30°C60%RHのデータが他のものと比較し、小さい値を示しているがこれはバッチ間のバラツキによるものであると考えられる。図－4に乾燥条件の違いが乾燥開始以降のコンクリートの剛性低下に及ぼす影響を評価するため、乾燥開始時の動弾性係数に対する乾燥開始7日後の動弾性係数を百分率（相対動弾性係数）で表した結果を示す。図より、高強度コンクリートの相対動弾性係数の変動は普通強度コンクリートに比

べ、小さいことがわかる。また、同一温湿度条件で比較すると、普通強度コンクリートでは材齢 28 日から乾燥を開始させた場合、相対動弾性係数の値が最小となっているのに対して、高強度コンクリートでは乾燥開始材齢 7 日の場合に相対動弾性係数が最も低下しており、両者で異なる傾向を示した。その理由は、高強度コンクリートでは材齢 7 日で材齢 28 日に近い細孔組織を有し、なおかつ細孔中に自由水が残存しているため、乾燥に伴いこの水が逸散することにより過大な収縮応力が発生し、組織が弛緩したためであると考えられる。一方、普通強度コンクリートでは材齢 7 日時点では細孔組織が緻密化されていないため、水和が十分に進んだ材齢 28 日で乾燥を開始させることにより、微細なひび割れが発生し剛性が低下したものと考えられる。このように乾燥前後の動弾性係数の経時変化を測定することにより、配合や乾燥条件の違いが、水和による組織の緻密化や乾燥による微細ひび割れの発生に及ぼす影響について、その傾向を把握可能であることが示唆された。

4. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) コンクリートの収縮挙動は周囲の温湿度条件に大いに依存し、温度が高く、相対湿度が低いほど収縮量が増大する。また、乾燥開始材齢が遅くなるに従い、少ない水分逸散量で大きな収縮を引き起こす。
- (2) 上記の収縮挙動は、乾燥開始時の細孔組織の緻密性とその時の含水状態、さらにはその後の温湿度条件に応じた水和反応性や水分逸散性に依存するため、これらの物性の異なる高強度コンクリートと普通強度コンクリートでは収縮挙動が異なる傾向を示す。
- (3) 動弾性係数は、水和の進行に伴う組織の緻密性やその後の乾燥に伴う組織の弛緩を評価するうえで有効な指標となることが示唆された。

今後は、温湿度条件の組合せをさらに拡張させ、温度 5℃から 30℃、相対湿度 30%から 80%の範囲で体系的な実験を行い、高強度コンクリートの収縮挙動に及ぼす温湿度依存性を究明する予定である。

謝辞 本実験において、本学土木工学科 4 年生（現（株）ピーエス三菱）の佐藤純也君に多大なる協力を頂いた。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 例えば、自己収縮研究委員会：報告書、日本コンクリート工学協会、1996.11
- 2) 例えば、Wiegrink, K. et al. :Shrinkage Cracking of High-Strength Concrete, ACI Materials Journal, Vol.93, No.5, pp.409-415, Sep./Oct. 1996
- 3) 例えば、岩城一郎、鈴木慎一、三浦尚：高強度コンクリートに発生する収縮ひび割れに関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.24, CD-ROM, 2002.6
- 4) コンクリートの自己収縮研究委員会：報告書、日本コンクリート工学協会、2002.9
- 5) コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形研究委員会：報告書、日本コンクリート工学協会、2001.7
- 6) 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, pp.1-19, 2001.11
- 7) 宮澤伸吾、黒井登起雄、北田悦子：高強度コンクリートの収縮性状に及ぼす乾燥の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21, No.2, pp.679-684, 1999
- 8) 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