

論文 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

岩城 一郎^{*1}・鈴木 慎一^{*2}・三浦 尚^{*3}

要旨：高強度コンクリート及び普通強度のコンクリートを対象に，コンクリート内部に鉄筋を埋め込んだ一軸拘束供試体を作製し，乾燥開始材齢及び温湿度条件を変化させた環境下における自己収縮及び乾燥収縮に起因した収縮ひび割れ性状について検討を行った。本実験の範囲において，高強度コンクリートは普通強度のコンクリートと比較し，明らかに収縮ひび割れが卓越すること，高強度コンクリートに発生する収縮ひび割れは，乾燥開始材齢が早いほど，また，温度が高く，相対湿度が低いほど顕著に現れることが確認された。5 環境下におかれた供試体に発生するひび割れ量は，他の環境条件と比較し，明らかに少なかった。

キーワード：高強度コンクリート，収縮ひび割れ，自己収縮，乾燥収縮，ひび割れ面積

1. はじめに

近年，急速に普及している高強度コンクリートは，単にコンクリートに高強度性を付与するだけでなく，細孔組織の緻密化により，外部からコンクリート内部への有害な物質の浸入を防ぐことが可能となるため，高耐久コンクリートとしての役割も担うことが期待されている。一方，高強度コンクリートは普通強度のコンクリートと比較し，セメントの水和反応に起因する自己収縮が増大することが知られており¹⁾，これに乾燥収縮の影響が加味され，さらにこれらの収縮が鉄筋等により拘束を受けると，耐久性上有害なひび割れが発生する恐れのあることが指摘されている²⁾。前述の通り，高強度コンクリートは本来優れた耐久性をも持ち合わせていると考えられるが，この種のひび割れから塩分を始め有害な物質がコンクリート内部へと浸入すると，鉄筋腐食を始め劣化が進行し，高強度コンクリートに期待される耐久性が著しく損なわれる危険性がある。

当該分野における既往の研究成果^{1), 3)}は，高強度コンクリートの自己収縮及び乾燥収縮挙動について調べたものが多く，その結果発生する

ひび割れについて検討を行った研究例は少ない。また，収縮ひび割れを扱った研究⁴⁾においても，ひび割れ発生材齢に着目したものがほとんどで，ひび割れ発生後のひび割れの進展状況や最終的なひび割れ性状について言及したものはほとんどない。さらに，既往の研究は，一般的な温湿度条件（例えば 20～60%RH）において，使用材料や配合条件の違いが収縮あるいはひび割れに及ぼす影響に着目したものが多く，環境条件の違いがひび割れ性状に及ぼす影響について検討した例はほとんど見当たらない。以上の背景から，本研究では，乾燥開始材齢及び実環境を想定した様々な温湿度条件下における自己収縮及び乾燥収縮に起因した高強度コンクリートのひび割れ性状について検討することを目的とした。

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/cm^3 ，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/cm^3 ，

*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 工学研究科土木工学専攻

*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	3290	2-26	3-39	26.5	42.4	60.1	1.5	2.0	1.3	0.61	0.005

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
PI25	20	25	48	170	680	711	844	9.52	0.024	
PI60	20	60	42	170	283	759	1149			0.071

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 $650 \pm 50\text{mm}$ ）を付与した。さらに、高強度コンクリート、普通強度の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 $4.5 \pm 1.5\%$ ）。

配合表を表 - 2 に示す。表中の PI25 は、水セメント比 25%の高強度コンクリートである。一方、PI60 は水セメント比 60%の普通強度のコンクリートである。単位水量は両コンクリートとも $170\text{kg}/\text{m}^3$ 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

実験に使用した供試体は $10 \times 10 \times 38\text{cm}$ の鉄筋コンクリート角柱供試体であり、断面の中心には D32 の横ふし型異形鉄筋（SD345）を 1 本埋設している。供試体断面の形状・寸法は既往の文献¹⁾で提案されている「コンクリートの自己収縮応力試験方法（案）」と同一とし、供試体の長さについては、供試体を保存する恒温器の寸法が幅、奥行き共に 50cm 程度であること、既往の文献⁵⁾により、本供試体と同様の配合、断面形状を有する供試体両端の定着長は 20cm 以内であること、温度ひずみによる影響はできるだけ取り除くこと等を考慮し、決定した。な

お、本供試体と同様の寸法を有する無拘束供試体（ $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ ）の中心に埋め込んだ熱電対による供試体温度測定結果より、この程度のサイズの供試体であれば、20 一定養生下における高強度コンクリートの水和発熱に伴う温度上昇量は十分に小さく、温度ひずみの影響はほぼ無視できることが確認されている。

本研究は、収縮ひび割れ性状に及ぼす乾燥開始材齢の影響（シリーズ 1）と温湿度条件の影響（シリーズ 2）について調べることを目的としており、以下にそれぞれの実験方法を記述する。

(1) 乾燥開始材齢の影響（シリーズ 1）

乾燥開始材齢は 1 日と 7 日の 2 種類とした。これは、早期に脱型を行った場合と 7 日間型枠を存置した場合を想定したものであるが、既往の研究⁶⁾において、乾燥開始材齢 1 日に比べ、7 日前後で全収縮量が最大となる場合があるとの報告に基づき設定された値でもある。打込みは 20 恒温室で行い、型枠内の供試体は、その上面をラップフィルムによりシールすると共にその上に湿布を被せ、水分の逸散を防いだ。全ての供試体は打込み後 24 時間で脱型を行い、乾燥開始材齢 1 日のものは、直ちに $20 \pm 5\% \text{RH}$ に管理された恒温恒湿室内で乾燥を開始させた。乾燥開始材齢 7 日のものは、脱型後、直ちに供試体全面をラップフィルムで覆い、さらにその上からビニールテープを巻いて 20 恒温室内で封かん状態を保ち、材齢 7 日後、ビ

ニールテープ及びラップフィルムをはがし，前述の恒温恒湿室内で乾燥を開始させた。供試体は材齢 1 日，3 日，7 日，14 日，21 日，28 日，56 日，91 日，154 日，182 日において質量を測定すると共に，供試体表面を観察し，ひび割れ発生の有無，及びひび割れが確認された場合，その長さと幅，特徴等を記録した。このうち，材齢 91 日，154 日，182 日においては，ひび割れ発生量を定量評価するため，供試体の各面（上下面及び両側面）にトレーシングペーパーをあてて，ひび割れを写し取り，ひび割れ 1 本ごとに，その長さを 4 等分した 3 箇所においてひび割れ幅を顕微鏡により測定し，ひび割れ長さに 3 箇所のひび割れ幅の平均値を掛けた値（ひび割れ 1 本当りのひび割れ面積）を累積することにより，供試体に発生したひび割れ面積を算出した。

(2) 温湿度条件の影響（シリーズ 2）

供試体は 12 本作製し，打込み後材齢 1 日まで前述の方法により封かん養生を行い，脱型後，20 60%RH，30 60%RH，30 30%RH の各温湿度に管理された恒温恒湿室（及び恒温恒湿器）に 3 本ずつ保存した。残りの 3 本は，低温環境下における収縮ひび割れ性状を調べるため，温度については制御可能であるが，湿度については厳密に管理できない恒温室内（5 ）に保存した。この恒温室の平均相対湿度は約 45%であった（以下 5 45%RH と記す）。これらの温湿度条件は，我が国で実際に起こりうる環境条件を想定したものであり，かつ同一相対湿度条件下における温度の影響及び同一温度条件下における相対湿度の影響を調べることができるよう配慮したものである。供試体は材齢 1 日，3 日，7 日，14 日，21 日，28 日で質量を測定するとともに，ひび割れの観察を行い，さらに材齢 28 日で前述の方法に従いひび割れ面積を測定した。

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

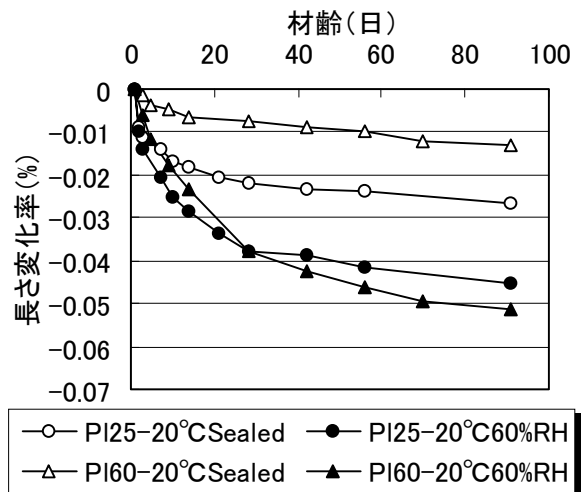


図-1 長さ変化率測定結果

（PI25）及び普通強度のコンクリート（PI60）の材齢 28 日における圧縮強度及び割裂引張強度は，高強度コンクリートでそれぞれ 73.8MPa，4.41MPa，普通強度のコンクリートで 32.2MPa，2.56MPa であった。また，基本的な条件である，20 一定封かん養生を行った場合（自己収縮のみの影響）と材齢 1 日から 20 60%RH 環境下で乾燥を開始させた場合（自己収縮 + 乾燥収縮の影響）の両コンクリートの脱型後の自由収縮挙動を図 - 1 に示す。図より，高強度コンクリートは普通強度のコンクリートと比較し，自己収縮の影響が卓越し，乾燥環境下では，材齢初期の収縮は促進するものの，材齢 28 日以降，収縮が停滞する傾向を示している。

3.1 乾燥開始材齢の影響（シリーズ 1）

図 - 2 に材齢の経過に伴う質量変化率測定結果を示す。これは乾燥開始材齢時の供試体質量に対する各材齢における供試体質量の変化を百分率で表した値である。図より，乾燥開始材齢によらず，高強度コンクリート（PI25）に比べ，普通強度のコンクリート（PI60）の質量変化率が明らかに大きいことがわかる。これは乾燥に伴う蒸発可能水，すなわちセメントの水和反応に使用されない細孔中の自由水が PI25 に比べ，PI60 で明らかに多いことから当然の結果であると言える。また，各配合とも乾燥開始材齢 1 日

の場合，7 日に比べ明らかに質量変化率が大きく，材齢が経過してもその差がある程度以下に縮まることはない。さらに，材齢 91 日以降質量変化率はほとんど変化しておらず，このことは水分の逸散がほぼ頭打ちの傾向を示していることを表している。図 - 3 に各材齢におけるひび割れ面積測定結果を示す。ひび割れ面積は各条件での供試体 2 本の平均値である。図より，高強度コンクリート（PI25）で測定されたひび割れ面積は普通強度のコンクリート（PI60）に比べ非常に大きく，材齢 182 日でおよそ 3 - 5 倍の値を示している。ひび割れの発生が確認された材齢は，PI25 で乾燥開始材齢 1 日の場合 7 日，乾燥開始材齢 7 日の場合 21 日，一方，PI60 では，それぞれ 91 日，56 日と，高強度コンクリートの方が明らかに早い。ひび割れは，そのほとんどが供試体の隅角部から発生し，鉛直方向へと進展するもので，一般に，供試体上面で多く発生し，逆に供試体底面ではほとんど発生していない。このようなひび割れ性状を示した理由として，供試体上面でのブリーディングの影響が考えられるが，ブリーディングの少ない高強度コンクリートにおいて普通強度のコンクリートに比べ明らかにひび割れ面積が卓越していることから，高強度コンクリートに発生したひび割れはそれ以外の影響，特に自己収縮による影響が大きいと考えられる。各供試体に発生するひび割れの形態は乾燥開始材齢によって異なるが，ひび割れ本数に関しては PI25 で 10 本前後，PI60 で 5 本程度，ひび割れ幅に関しては PI25 で 0.1mm 前後のものが多く存在していた（最大 0.12mm）のに対し，PI60 では，0.05mm 以下の微細ひび割れがほとんどであった。さらに，PI25 では，測定面を横断するひび割れが見られた（ひび割れ長さ 100mm）のに対し，PI60 ではひび割れ長さ 30mm 前後のものが主流であった。すなわち，高強度コンクリートでは普通強度のコンクリートと比較し，ひび割れ本数，ひび割れ幅，ひび割れ長さの全てにおいて大幅に上回る結果

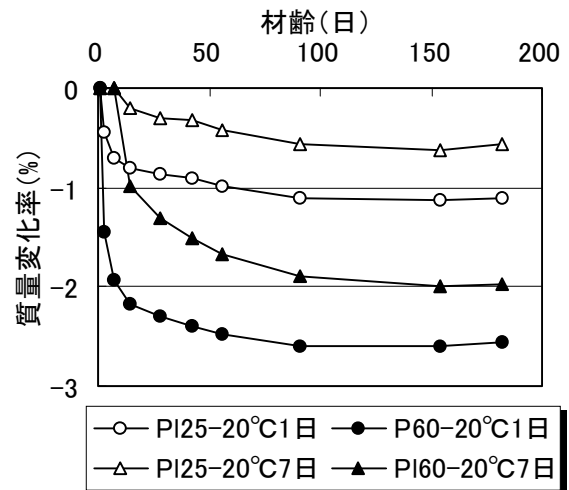


図-2 質量変化率測定結果(シリーズ1)

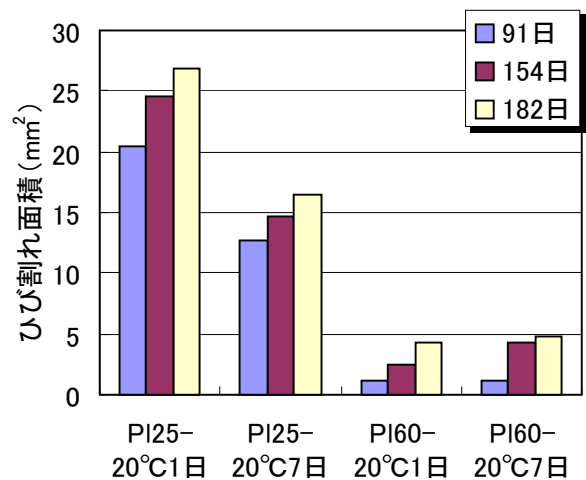


図-3 ひび割れ面積測定結果(シリーズ1)

となった。このような結果が得られた理由については，高強度コンクリートでは普通強度のコンクリートと比較し，自己収縮が大きく¹⁾，これに本実験のように材齢初期から乾燥収縮の影響が加わると，収縮ひずみが著しく増大すること，高強度コンクリートはクリープが小さく，発生する引張応力が緩和されにくい上，その引張強度は圧縮強度ほど顕著に発現しないこと等が影響していると思われる。収縮ひび割れの詳細な機構解明については今後の検討課題である。次に，材齢の経過に伴うひび割れの進展状況に着目すると，PI25，PI60 とともに，質量変化率は材齢 91 日以降ほぼ停滞しているにも係わらず（図 - 2 参照），ひび割れ面積に関しては材齢 91 日以降も，頭打ちの傾向を示しているとは言

えず、ひび割れはゆっくりではあるがさらに進行する可能性がある。PI25 のひび割れ面積に着目すると、乾燥開始材齢 1 日の場合、7 日に比べ、明らかに大きな値を示している。既往の研究⁶⁾において、乾燥開始材齢が 1 日に比べ、7 日前後で全収縮ひずみが最大となる場合があることが報告されているが、本研究のように普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比を 25%とした配合においては、早期に乾燥を開始させるほどひび割れ量が卓越する結果となった。一方、PI60 では、乾燥開始材齢 7 日の方が 1 日に比べ、わずかにひび割れ面積が大きいように見えるが、その差は非常に小さく、供試体間でのばらつきも大きいため、普通強度のコンクリートでは乾燥開始材齢によらず、ひび割れ発生量はほぼ同等であると判断される。

3.2 温湿度条件の影響（シリーズ 2）

図 - 4 に PI25 と PI60 の各環境条件に対する質量変化率を示す。PI25 に比べ、PI60 の質量変化率が明らかに大きいことは前述の通りであるが、環境条件の違いによる各配合の質量変化率に着目すると、その値は、30 30%RH、30 60%RH、20 60%RH の順となっており、同じ温度であれば相対湿度が低いほど、また同じ相対湿度であれば温度が高い方が質量の減少がより顕著に現れている。セメントの水和反応速度は、温度が高いほど大きくなるため、30 60%RH は 20 60%RH と比較し、同一材齢においては、明らかに水和によって消費される水量が多い、つまり、蒸発可能水量が少ないと考えられるが、それ以上に周辺環境とコンクリート内部の水分状態が平衡を保つために水分逸散量が多くなり、このような結果が得られたと考えられる。同様の理由により、5 45%RH は、もし 60%RH に管理されていれば、明らかに 20 60%RH に比べ、水分逸散量が少なくなると考えられるが、実際には相対湿度が 45%であったため両者の質量変化率はほぼ同じ傾向を示した。

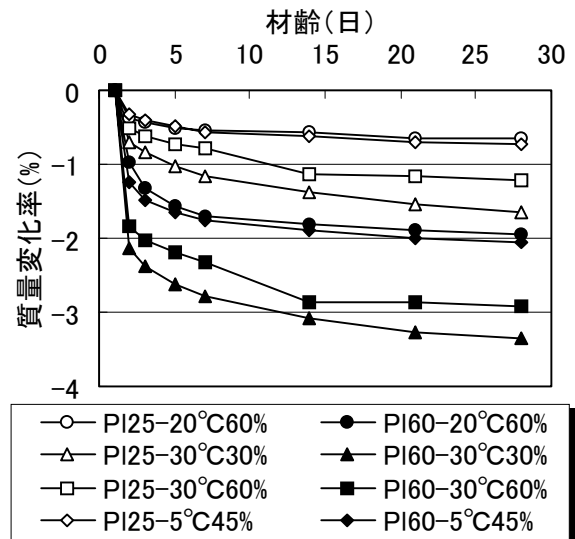


図-4 質量変化率測定結果(シリーズ2)

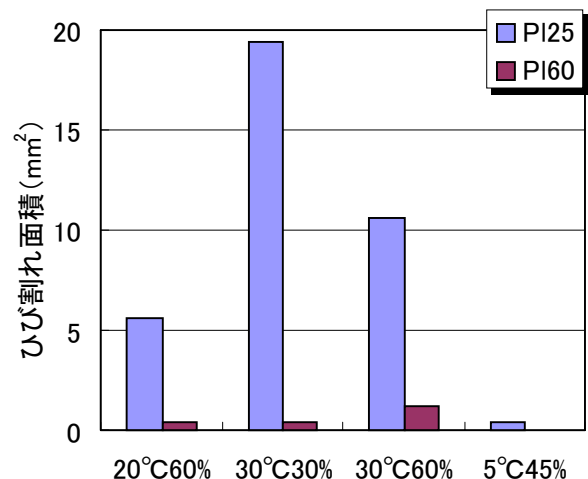


図-5 ひび割れ面積測定結果(シリーズ2)
配合による違い

図 - 5 にひび割れ面積測定結果を示す。ひび割れ測定材齢が 28 日と比較的早いため、PI60 ではまだほとんどひび割れが発生しておらず、図 - 3 以上に PI25 と PI60 のひび割れ面積の差が大きくなっている。PI25 に着目すると、ひび割れ面積は 30 30%RH、30 60%RH、20 60%RH、5 45%RH の順になっており、質量変化率同様、同じ温度であれば相対湿度が低いほど、また同じ相対湿度であれば温度が高い方がひび割れが顕著に発生する結果となった。低温環境下におかれた 5 45%RH では、質量変化率は 20 60%RH とほぼ等しいにもかかわらず、ひび割れ発生量は極端に少なく、乾燥に伴う水分逸散量は必ずしも収縮ひび割れ量とは対応し

ていないことを示している。本実験で使用したコンクリートの配合から粗骨材を取り除いたモルタル供試体(4×4×16cm)を用い、本実験と同じ4種類の温湿度条件下における自由収縮ひずみを測定した研究結果⁷⁾より、材齢10日前後までは、高温環境(30 30%RH, 30 60%RH)において、収縮が促進し、低温環境(5 45%RH)では、収縮が著しく遅延するのに対し、その後30 60%RHの収縮は停滞し、材齢28日においては、5 45%RHの収縮に追い越されることが報告されている。これらの収縮挙動と本実験で得られたひび割れ面積測定結果より、ひび割れ面積は材齢初期の収縮が促進する30 30%RH, 30 60%RHにおいて顕著に増大し、初期の収縮が遅延する5 45%RHでは、明らかに低下することから、高強度コンクリートでは単に収縮量だけでなく、材齢初期の収縮速度が収縮ひび割れ量に影響を及ぼしている可能性が示唆される。また、収縮ひび割れ機構は、こうした収縮ひずみ挙動だけでなく、弾性係数、引張強度、クリープと言った物性にも依存することが知られているが、乾燥時の温湿度条件がこれらの物性に及ぼす影響についてはまだ不明な点が多く、環境条件の違いが高強度コンクリートの収縮ひび割れ性状に及ぼす影響に関する機構解明については今後の研究課題である。一方、P160では、ひび割れがまだほとんど発生しておらず、環境条件の違いを考察できる段階ではない。中でも、5 45%RH環境下ではまだどの供試体にもひび割れは発生していない。

4. まとめ

本研究の範囲内で、以下の結論が導かれた。

- (1) 普通強度のコンクリートに比べ、高強度コンクリートにおいて自己収縮及び乾燥収縮に起因した収縮ひび割れがより顕著に現れる。
- (2) 高強度コンクリートの場合、乾燥開始材齢を1日とした場合、7日に比べ、顕著に収

縮ひび割れが増大する。一方、普通強度のコンクリートでは両者の間に顕著な違いは見られない。

- (3) 高強度コンクリートに発生する収縮ひび割れは温湿度条件の影響を大いに受ける。すなわち、温度が同じであれば相対湿度が低いほど、また、相対湿度が同じであれば温度が高いほどひび割れは顕著に現れる。5 環境下におかれた供試体は、他の環境条件と比較し、ひび割れ発生量が著しく少ない。

参考文献

- 1) 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
- 2) 例えば，Wiegrink, K. et al.: Shrinkage Cracking of High-Strength Concrete, ACI Materials Journal, Vol.93, No.5, pp.409-415, 1996
- 3) 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
- 4) 例えば，大野俊夫，魚本健人：コンクリートの収縮ひび割れ発生予測に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.662，pp.29-44，2000
- 5) 林田都芳，大野義照，中川隆夫：コンクリートの自己収縮応力試験における拘束鉄筋と試験体長の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.733-738，1999
- 6) 例えば，内藤英晴：コンクリート充填型合成構造への高流動コンクリートの適用に関する研究，東北大学大学院博士学位論文，1998
- 7) 鈴木慎一，佐藤純也，岩城一郎：様々な環境下における高強度コンクリートの自己収縮及び乾燥収縮挙動，土木学会東北支部技術研究発表会（平成13年度），pp.546-547，2002