

論文 水和熱による高温履歴が高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす影響

丁 海文*¹ ・河野広隆*² ・渡辺博志*³ ・鈴木雅博*⁴

要旨 : 自己収縮の温度依存性を調べるために高温の一定温度養生の供試体と水和熱による温度履歴を受けるコンクリートブロック供試体で検討を行った。自己収縮ひずみは各温度履歴に対し依存する傾向を示した。始発から一定温度で養生した条件では養生温度が高くなるほど初期の膨張が大きく、自己収縮の終局値は小さくなる傾向を示した。また、水セメント比が小さくなるほど高温の影響が大きかった。ブロック供試体は水和熱による高温の温度履歴にもかかわらず初期の膨張がなく、自己収縮も大きくなった。自己収縮ひずみのマチュリティによる表現は難しいと考えられた。

キーワード : 高強度コンクリート, 自己収縮, 温度履歴, マチュリティ, 水和熱

1. はじめに

高強度コンクリートは単位セメント量が多いので、セメントの水和に伴う温度応力と自己収縮による応力の発生でひび割れの発生危険性が高くなる可能性がある。実際の部材の温度条件は様々であるので、コンクリートの自己収縮ひずみによって部材に生じる収縮応力を定量化するためには、自己収縮ひずみの進行に及ぼす温度の影響を加味した評価を行う必要がある。

自己収縮に関する研究は 1990 年代以後多く行われているが¹⁾、自己収縮の温度依存性については、必ずしも十分に明らかにはされていない²⁻⁵⁾。特に水和熱による高温履歴を生じるマス供試体で自己収縮を直接測定した例はあまり報告されていない。

本研究では、自己収縮の温度依存性を調べるために高温の一定温度養生と水和熱による温度履歴を受けるコンクリートブロック供試体で実験を行って、自己収縮ひずみの温度依存性に関するメカニズムと温度効果による自己収縮ひずみの推定について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に使用材料の品質を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材は静岡県浜岡産川砂を、粗骨材は茨城県笠間市産砕石を使用した。混和剤は高性能 AE 減水剤を使用した。

2.2 コンクリート配合

コンクリートの配合は、単位水量を 160kg/m³、水セメント比を 25, 30, 40%, 粗骨材かさ容

表-1 使用材料

材料	種類・産地	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm ³ 比表面積 3210 cm ² /g
細骨材	静岡県浜岡産川砂	表乾比重 2.62 吸水率 1.24% 粗粒率 2.99
粗骨材	茨城県笠間市産砕石	表乾比重 2.66 吸水率 0.84% 粗粒率 6.5 実積率 60.9%
混和剤	高性能 AE 減水剤	ホリカルボン酸系

*¹ 建設省土木研究所 コンクリート研究室 工博 (正会員)

*² 同 室長 工修 (正会員)

*³ 同 主任研究員 工修 (正会員)

*⁴ プレストレスト・コンクリート建設業協会 工修 (正会員)

表-2 コンクリートの示方配合とフレッシュコンクリートの性状

バッチ名	W/C (%)	粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	s/a (%)	SP (Cx%)	単位量 (kg/m ³)				スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
					W	C	S	G			
N25	25	0.59	41.8	2.6	160	640	675	956	22.1	1.6	22.3
N30	30		44.8	1.8	160	533	763	956	22.0	1.6	21.5
N40	40		48.2	2.0	160	400	874	956	20.3	1.4	20.5

積比を 0.59 (m³/m³) とした。スランブ 21±2.5cm, 空気量 2.0±1.0% を目標に高性能 AE 減水剤の量を調整して示方配合を決めた。表-2 に示方配合とフレッシュコンクリートの性状を示す。練り混ぜは容量 50 リットルの 2 軸ミキサを用いて行った。

2.3 実験方法

自己収縮ひずみの温度依存性を調べるために 20°C, 40°C, 60°C の一定温度養生条件と水和熱による高温度履歴を示すコンクリートブロックの条件で自己収縮ひずみを測定した。一定温度養生条件の場合に供試体は 10×10×40cm とし、木製型枠に打ち込んだ。コンクリート打設は 20°C で行って、20°C 一定温度養生は 20°C に調節された実験室で、40°C, 60°C の養生はコンクリートの凝結の始発時間から 40°C, 60°C の恒温槽で行った。コンクリートの自由変形が拘束されるのを防ぐために、型枠の底面の内側にテフロンシート (厚さ 1mm), 両端部の内側に発泡スチロール (厚さ 2cm) を入れた。内側の側面、端面および底面にポリエステルフィルム (厚さ 0.1mm) を入れ、コンクリート試料と型枠が接触しないようにした。コンクリートを打込んだ後で水分の蒸発を防ぐため、プラスチックシートで型枠を覆った。

コンクリートブロックの場合は厚さ 40cm の発泡スチロール型枠を用いて 40×40×40cm の供試体寸法とした。

ひずみの測定には埋め込みゲージを使用した。コンクリートの自己収縮ひずみは供試体のひずみから温度変化によるひずみを差し引いた値とし、コンクリートの熱膨張係数は 10×10⁻⁶/°C

と仮定した。自己収縮ひずみはコンクリート凝結の始発時間を初期値とした。予備試験では 1 ケース 3 本の供試体で測定を行ったが、結果のばらつきが小さかったので、本研究に示すデータはいずれも 1 本の供試体による測定結果になる。

3. 試験結果および考察

3.1 凝結及び圧縮強度、ヤング率特性

コンクリートの凝結特性及び圧縮強度、ヤング率試験結果を表-3 に示す。水セメント比 25% の場合は高性能 AE 減水剤の添加量がセメント量の 2.6% にもかかわらず凝結の遅延は認められなかった。

3.2 自己収縮特性

自己収縮ひずみの測定結果を図-1 と図-2 に示す。図-1 は配合別、図-2 は温度別に結果を示している。一定温度養生条件では水セメント比が小さくなるほど自己収縮が大きくなった。一方、同じ配合条件で比べると養生温度が高くなるほど初期の膨張が大きく、自己収縮の終局値は小さくなる傾向を示す。水セメント比が小さくなるほど自己収縮に及ぼす高温の影響が大きくなる。図-2 の温度別の結果を見ると、養生温度が高くなるほど配合の違いによる自己収縮の差は小さくなる。

表-3 コンクリートの物性

バッチ名	凝結 (時:分)		圧縮強度 (N/mm ²) (28 日)	ヤング率 (×10 ⁴ N/mm ²) (28 日)
	始発	終結		
N25	7:35	10:30	91.7	4.19
N30	9:00	11:45	81.8	4.00
N40	9:50	12:20	66.1	3.92

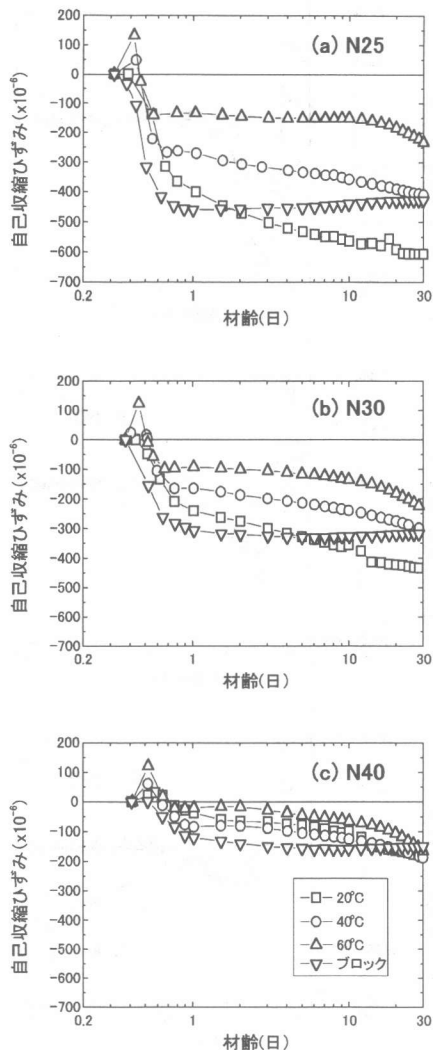


図-1 各配合別温度履歴による自己収縮の経時変化

図-3 はブロック供試体の温度履歴を示したものであり、材齢 1~2 日に最高温度が 70°C~90°C に至った。図-4 にブロック供試体の温度と自己収縮ひずみとの関係を示す。昇温時に膨張はなく、温度が上昇するに従って収縮が生じ、温度がピークに達した後、温度が低下してもほぼ一定値を示している。

ブロック供試体の場合には 70°C 以上の高温の温度履歴を受けたにもかかわらず、ひずみ相は高温の一定温度養生条と異なった。初期の

収縮速度は 20°C 養生の場合よりはるかに大きい。自己収縮の終局値は小さくなった。また、降温時に非常にわずかであるが、膨張が認めら

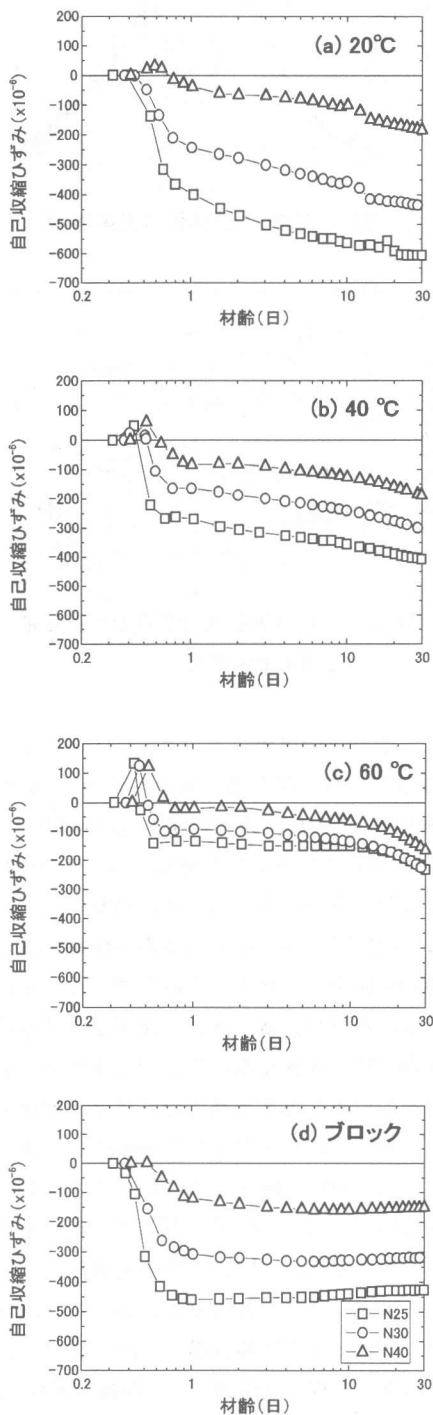


図-2 各養生条件別自己収縮の経時変化

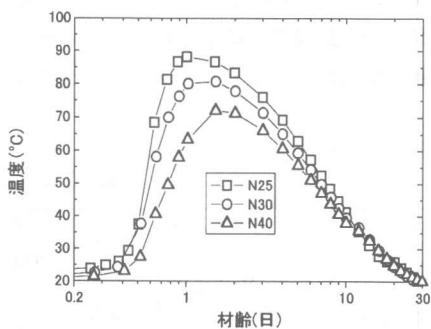


図-3 ブロック供試体の温度履歴

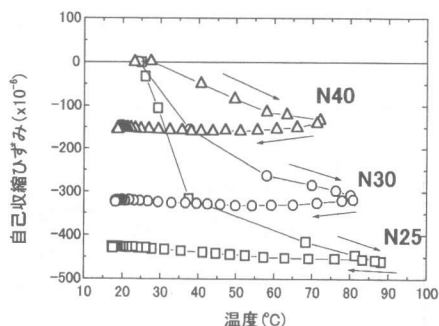


図-4 ブロック供試体の温度と自己収縮ひずみとの関係

れた。これは降温時にコンクリート内部に水分の再分布のため起こると考えられる。図-5に材齢1日以内の極初期のひずみ変化速度を示す。

図-5に示すひずみ変化速度は10分あたりに生じたひずみの差を1日当りに換算したものである。(+)の方が膨張，(-)の方が収縮である。全体的に材齢1日経過した時点でひずみ変化速度が0になった。水セメント比が小さくなるほど収縮速度が大きくなった。同じ水セメント比の配合では養生温度が高くなるほど初期膨張と自己収縮が早期に生じることが認められた。

N25 と N30 の 場合 では、20°C 養生とブロック養生時に始発から収縮が起り、0.5 日にピークに達したが、40°C、60°C の高温養生では始発からまず膨張し、次に 0.4 日から収縮が起こった。ブロック供試体の場合には高温の一定養生と異なり初期に膨張がなく、収縮速度は 60°C の場合と同様に大きかった。

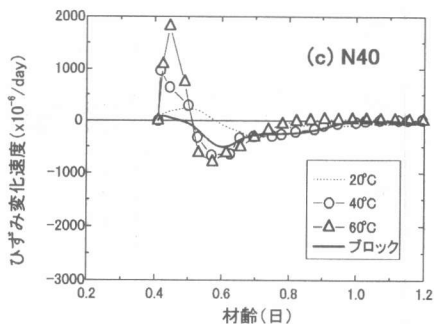
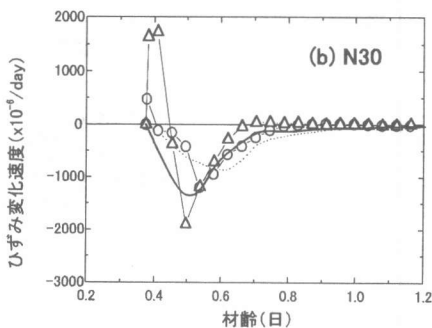
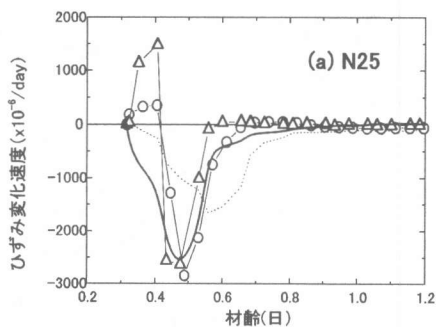


図-5 各配合別初期のひずみ変化速度

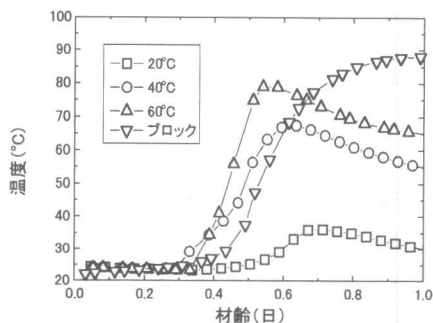


図-6 N25 の各養生条件別初期温度履歴

高温の温度履歴があるブロック供試体の場合

と高温一定養生とで自己収縮パターンが異なる理由について検討する。図-6 に水セメント比25%のコンクリートの各養生条件における温度上昇パターンを示す。40℃や60℃の一定温度養生の場合は始発時点から高温槽に入れたので、急速な温度上昇を示したが、ブロックは水和熱による温度上昇であり、始発からの温度上昇の立ち上がりは40℃や60℃の一定温度養生より緩慢である。40℃と60℃の一定養生条件では材齢0.5日(12時間)以内に40℃以上の高温履歴を受けるが、ブロック供試体の場合には、自己収縮速度が大きくなる時期よりも後に高温の履歴を受けていることになる。即ちコンクリートの温度上昇と自己収縮とのタイミングが異なっている。

一般的に注水から3~4時間後にエーライトの水和が始まって、8時間までこの水和反応が加速され、水和反応がピークに到達する。水セメント比が25%で非常に小さい場合にはこのピーク時間が12時間で少し遅くなる傾向がある⁶⁾。また、水和初期にセメントゲルが水を吸収し、吸収した水の膨張圧とゲルの表面張力の減少とによって膨張現象(swelling)が生じるとされている⁷⁾。膨張は水セメント比が大きいほど大きくなる。膨張後水和反応が進行しながら収縮が起こる。40℃と60℃の高温養生の場合に水セメント比が小さくても膨張が起こっているが、この膨張は水の熱膨張率がセメントゲルよりはるかに大きいため、これによる膨張が水和反応による収縮より大きいので生じるのである。特に、この時期はまだ強度が発現する前であり、ヤング係数が非常に小さく、組織の骨格が弱いので、膨張が急速に生じると考えられる。この初期膨張のため、自己収縮の終局値は小さくなると考えられる。

この後エーライトの水和反応が進行し、水和物が生成しながら収縮が起こる。特に高温の場合は初期に水和反応が急激に起こり、セメント粒子の表面に水和物が生成され、粒子内部の反応を抑制するため持続的な収縮が起こらないと

考えられる。

しかしながら、ブロックの場合には水和熱による温度上昇は初期の水和反応がピークになった後に生じるので、膨張に影響を与えないと考えられる。従って、初期の収縮が大きくても、高温の履歴のため持続的な収縮が起こらないので、20℃養生より終局値が小さくなったものと考えられる。すなわち自己収縮は水和初期の初期膨張と関係があり、膨張が生じるか否かは、コンクリートの温度上昇と水和反応の進行のタイミングによって変化する。自己収縮ひずみは始発時間前後に高温の養生による膨張により低減すると考えられる。

なお材齢約0.5日までの20℃養生とブロック供試体は温度履歴が似ているが、ブロック供試体の自己収縮が大きかった。これは自己収縮について寸法効果が影響している可能性があると考えらる。

次に、任意の温度履歴に対してマチュリティ関数による自己収縮ひずみの表現が可能かどうか検討を行った。図-7は有効材齢の関数としてN25の自己収縮ひずみを表現したものである。有効材齢はMC90に示される強度に関する温度効果の関係式を用いた。

$$t_r = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[\frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} - 13.65 \right]$$

t_r : 有効材齢

Δt_i : 温度が T ℃である期間の日数

$T(\Delta t_i)$: Δt_i 間の温度

T_0 : 1℃

ここで Q 値(ΔE (活性化エネルギー)/ R (気体定数))として通常 4,000 °K が設定されているが、図-7より $Q=4,000$ °K として求められる有効材齢では自己収縮を表現できていないことが分かる。 Q としてそれより大きい 12,000 °Kと設定して有効材齢を計算した場合の有効材齢と自己収縮ひずみの関係を図-8に示す。材齢2日までは20℃とブロック双方の関係が一致したが、

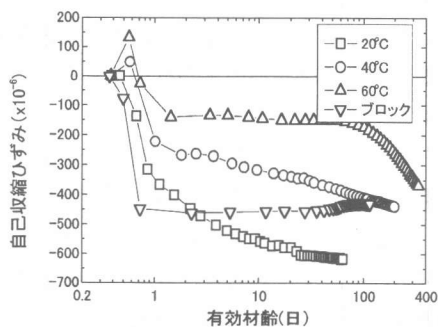


図-7 自己収縮ひずみと有効材齢の関係
($Q=4,000^{\circ}\text{K}$)

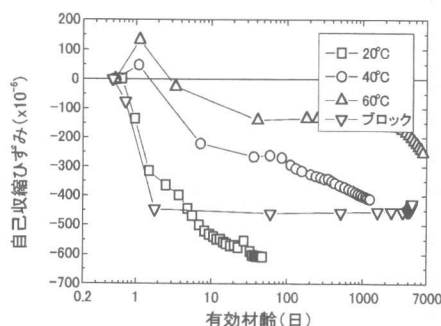


図-8 自己収縮ひずみと有効材齢の関係
($Q=12,000^{\circ}\text{K}$)

$Q=4,000^{\circ}\text{K}$ の場合と同じ様に高温の一定温度養生の場合とはかけはなれたものになっている。これまで、自己収縮ひずみはマチュリティにより評価できるとする報告^{2, 3)}と、できないとする報告^{4, 5)}があり、定まった結論は得られていない。この理由として、コンクリートの配合条件、温度履歴などが複雑に影響していることが考えられる。

4. まとめ

- 1) 自己収縮ひずみは各温度履歴に対し依存する傾向を示した。一定温度養生条件の場合には養生温度が高くなるほど初期の膨張が大きく、自己収縮の終局値は小さくなる傾向を示す。水セメント比が小さくなるほど高温の影響が大きかった。ブロック供試体の場合には高温の温度履歴を受けるにもかかわらず初期の膨

張がなく、自己収縮も大きくなった。これはブロック供試体では高温温度履歴を受けるのが遅れたためと考えられる。また、自己収縮ひずみは水和初期の膨張により低減されると考えられる。

- 2) 自己収縮ひずみのマチュリティで表現が難しい。有効材齢で $Q=12,000^{\circ}\text{K}$ として表現した場合に 20°C とブロックの方は材齢 2 日まで一致したが、高温の一定温度養生とは合わない。これは自己収縮ひずみがコンクリートの配合条件、温度履歴などに複雑に影響されるためと考えられる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会，自己収縮委員会報告集，1996。
- 2) E.Tazawa, Y.Matuoka, S.Miyazawa and S. Okamoto : Effect of Autogenous Shrinkage on Self Stress in Hardening Concrete, Thermal Cracking in Concrete at Early Age, pp.221-227, London, 1994.
- 3) 橋田 浩，黒田 泰弘，山崎 庸行，友澤 史紀：高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート構造部材の初期ひび割れに関する実験ならびに応力解析，コンクリート工学論文集，Vol.10, No.1, pp.51-63, 1999.
- 4) 竹田 宣永，松永 篤，米田 俊一，十河 茂幸：水和熱による温度履歴が高強度コンクリートの自己収縮応力に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.1, pp.1417-1422, 1997
- 5) O.Bjontegaard and E.J.sellevoid : Thermal Dilation-Autogenous Shrinkage : How to Separate?, Autogenous Shrinkage of Concrete, pp.245-256, 1999.
- 6) 平尾 宙，内川 浩，羽原 俊祐：硬化セメントペーストの湿度及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報告集，Vol.18, No.1, pp.705-710, 1997
- 7) 岩崎 訓明，西林 新蔵，青柳 征夫：フレッシュコンクリート・硬化コンクリート，p.201, 技報堂出版，1981.