

論文 高強度コンクリートの線膨張係数に関する研究

丁 海文*¹・河野 広隆*²・渡辺 博志*³・佐藤 重一*⁴

要旨：若材齢における高強度コンクリートの線膨張係数の測定のため、供試体の寸法を小さくし、温度変化速度を上げることにより、自己収縮ならびに供試体に発生する内部応力による影響が小さくなるように配慮し試験を行った。若材齢での線膨張係数は硬化コンクリートより大きく、終結後ほぼ一定値に収束することが認められた。線膨張係数の経時変化は指数減少関数で予測できた。コンクリートの温度履歴によっては、線膨張係数の設定が自己収縮ひずみの算定結果に大きな影響を及ぼす場合があると考えられる。

キーワード：高強度コンクリート、線膨張係数、自己収縮、若材齢、水和熱

1. はじめに

高強度コンクリート (HSC) は単位セメント量が多いので、それを用いる構造物は水和熱による温度上昇が大きくなり、ひび割れの発生危険性が高くなる可能性がある。また HSC は初期材齢に大きい自己収縮を示すため、温度応力を検討する際には自己収縮の影響を考慮しなければならない¹⁾。一般に、自己収縮ひずみの測定値は外部から拘束や乾燥の影響を受けないように密封した供試体を用い、測定した実ひずみから温度変化による温度ひずみを差し引いて得られる値である。よって、線膨張係数が正確に分からなければ、差し引くべき温度ひずみの値が明確でないので自己収縮ひずみも正確に求められなくなる。

線膨張係数は供試体に温度変化を与え、その時に生じる長さ変化を測定し、単位温度変化当たりのひずみ変化として定義される。線膨張係数の測定方法については、まだ国内外に規格化されたものはないが、一般に水分の逸散を防ぐために密封した供試体を温度可変槽に入れて供試体に温度変化を与え、温度変化によって生じ

るひずみを計測している。供試体の形状、寸法、温度変化速度なども決まっていないが、コンクリートの熱伝導率が小さいので、供試体の内部と表面の温度差が生じないように温度変化速度を小さくして試験を行っている。

一方、HSC の自己収縮ひずみは 1 日以内の若材齢に大部分が発生し、収縮が最も活発化する時点では 1 時間当たり約 100 μ 以上に達することが知られている²⁾。従って、供試体の温度変化速度を小さく設定する従来の線膨張係数測定方法では、温度ひずみ測定中に自己収縮ひずみが発生するため、正確な線膨張係数が得られないといった問題点がある。このため、若材齢における高強度コンクリートの線膨張係数は測定が難しく、これまでも報告されていないのが現状である。

本研究では、若材齢における自己収縮の影響が小さくなるように配慮して、高強度コンクリートの線膨張係数の測定を行った。若材齢における自己収縮の影響を小さくするためには、なるべく速く温度を上昇させなければならないが、温度上昇速度を大きくすると供試体の表面と内

*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-1 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

供試体 記号	セメント 種類	供試体 寸法(cm)	G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	SP (C× %)	単位量 (kg/m ³)		スラン プ (cm)	空気 量 (%)	凝結(時間:分)	
							W	C			始発	終結
N1	普通	5×5×20	13	25	41.8	2.6	160	640	21.5	2.0	7:35	10:30
N2	普通	10×10×40	20	25	41.8	2.6	160	640	22.5	1.9	7:35	10:30
H	早強	5×5×20	13	25	41.8	2.8	160	640	22.0	1.9	5:40	7:45
L	低熱	5×5×20	13	25	42.1	1.8	160	640	20.5	1.6	8:25	11:45

部との温度差による応力が発生し、正確な温度ひずみ測定ができない。本実験では内部と表面との温度差による応力発生を小さくするため、供試体の寸法を小さくし測定を行った。供試体の寸法を小さくするには、粗骨材を除いてモルタル供試体とせざるを得ないが、モルタル供試体では粗骨材の特性を無視することとなり適切ではない。よって、本実験では粗骨材最大寸法を13mmとした5×5×20cmの角柱供試体を用いた。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、ビーライト系低熱セメント（ビーライト含有量45%）を使用し、細骨材は静岡県浜岡産川砂（表乾比重2.62、粗粒率2.99）を、粗骨材は茨城県笠間市産砕石（表乾比重2.66、粗粒率6.5）を使用した。混和剤はポリカルボン酸系高性能AE減水剤を使用した。

2.2 コンクリート配合

表-1にコンクリート配合を示す。コンクリートの配合は、単位水量を160kg/m³、W/Cを25%、粗骨材かさ容積比を0.59（m³/m³）とした。スランプ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。供試体の寸法が5×5×20cmの場合の粗骨材最大寸法を13mmとし、10×10×40cmの供試体では20mmとした。

2.3 実験方法

供試体の温度変化を与える熱媒体として本研

究ではシリコンオイルを使用した。シリコンオイルは水より粘性が高く、脱枠がようやくできる始発時間前後においても供試体へ浸透し難く、セメントとの反応もないので、供試体の密封も不要である。ひずみの測定には埋め込み型ゲージを使用した。材齢1日までは脱枠後シリコンオイルバスに入れ、昇温速度80℃/hrの急速な温度変化を与えひずみを計測した。温度変化を与えた範囲は20℃から60℃までとした。材齢3日以後には5℃/hrの遅い昇温速度で測定を行った。測定材齢は始発、終結、終結と1日の間、1日、3日、28日とした。

3. 結果および考察

3.1 供試体の温度と温度ひずみの関係

普通ポルトランドセメントを用いたN1（5×5×20cmの供試体）とN2（10×10×40cmの供試体）の供試体温度とひずみ測定結果を図-1に示す。N1供試体では、いずれの材齢においても供試体温度とひずみの間には比較的高い直線性が認められたが、N2供試体では、終結時および材齢1日の時点で上に凸の曲線形を示していた。始発時にはN1、N2ともひずみと温度の間には直線性が認められたが、終結時では60℃でのひずみが500μ（N1）と350μ（N2）くらいで約150μの差を示していた。材齢1日では60℃で300μの同じひずみであるが、N2供試体の方が同一温度に対するひずみが大きくなっている。材齢28日ではN1、N2とも直線性が認められた。

図-2は測定時間における供試体の表面と内部の温度を示したものである。材齢1日での結

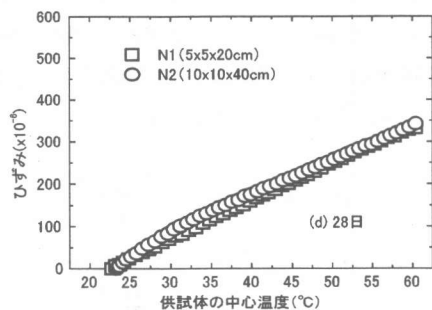
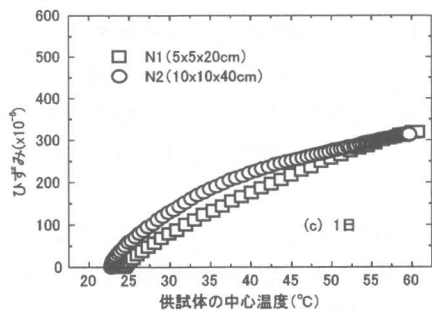
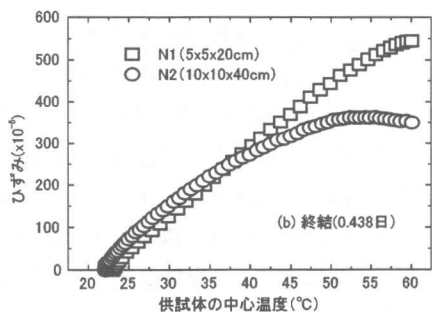
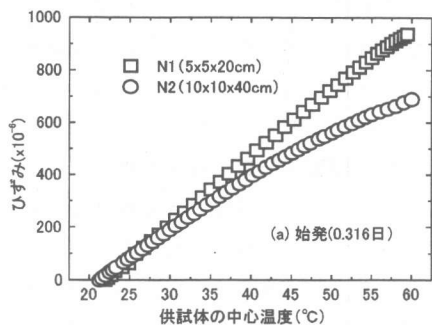


図-1 N1とN2の供試体の中心温度とひずみ

果によると、供試体の表面温度は30分で60℃まで上昇したが、供試体の内部温度が60℃まで上昇するにはN1の方が40分、N2の供試体が90分かかった。N2の供試体は表面と内部の温度差が20℃以上であった。供試体の内部と表面

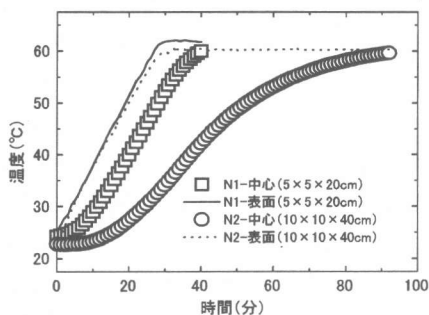


図-2 N1とN2供試体の測定中の内外温度 (材齢1日)

との温度差はN1のほうが少なかった。

始発時点でN2の供試体において表面と内部との温度差が大きくなるにも関わらず供試体温度とひずみの間に直線性が認められる理由について考える。図-3に若材齢におけるN2の静弾性係数の試験結果を示す。始発時点では強度発現が認められずこの時点での供試体の内外温度差による内部拘束は生じ難いと考えられる。コンクリートのヤング係数は終結直後から発現し、材齢1日ではすでに28日の70%程度の発現が認められ、立ちあがり非常に早い。従って、供試体の内部と表面との温度差による応力は終結以後から大きくなると考えられる。また、以前の報告によると²⁾、普通ポルトランドセメントを用いたW/C=25%のコンクリートの場合、始発を自己収縮の出発点とすると、自己収縮の速度は終結から急速になって、注水から12~14時間ごろでピークを示し、材齢1日に収束した。

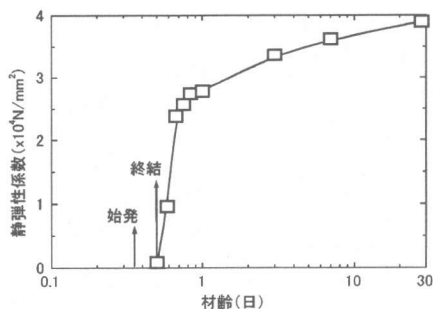


図-3 N2の静弾性係数の経時変化

すなわち、終結時点で、自己収縮ひずみ速度が大きいものの、コンクリートのヤング係数はまだ発現しはじめた所である。よって、N2 供試体でのコンクリートの線膨張試験結果について考えてみると、コンクリート温度とひずみの間に直線性が認められなかった主要因としては、温度ひずみ測定中に進行した自己収縮ひずみの影響と考えられる。一方、N2 供試体では、材齢 1 日においても温度とひずみ関係の非線形性が強いが、この時点では自己収縮ひずみ速度は小さいと予想される。これは図-2 に示すように、コンクリート供試体の温度変化速度が大きかったため、内外温度差による内部拘束が主な原因であったと考えられる。このように、終結～材齢 1 日程度の若材齢コンクリートの線膨張係数を正しく求めるためには、自己収縮の影響を排除するため測定に要する時間を短縮すること、すなわち温度変化速度を大きくするとともに、供試体の内外温度差による内部拘束の影響を小さくするため、温度変化速度に応じて供試体寸法を小さくする必要がある。今回の試験によると、5×5×20cm の小型供試体で 60℃まで温度上昇させた時の温度-ひずみ間の直線性が概ね良好であり、若材齢から硬化に至る間でも適切な線膨張係数が得られたものと考えられる。

図-4 は N1 供試体における各温度での線膨張係数を示したものであり、10℃区間ずつ発生したひずみを 1 次直線で回帰求めた線膨張係数である。材齢 28 日の場合にはほぼ一定値を示し、温度依存性はなかったが、若材齢の結果は

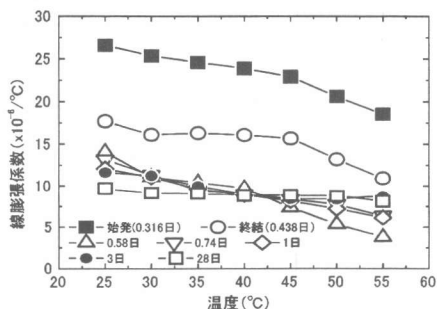


図-4 N1 の昇温による線膨張係数の変化

温度の上昇に従って線膨張係数が小さくなった。これは供試体内部の水分の蒸発による収縮、自己収縮、内部と表面との温度差による応力発生などに起因すると考えられる。

3. 2 線膨張係数の経時変化

図-5 にセメント種類による線膨張係数の経時変化を示す。セメント種類によって凝結時間が異なるが、始発時間で約 $25 \sim 30 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、終結時間で $14 \sim 17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、材齢 28 日で $9 \sim 10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、若材齢のほうが硬化コンクリートより大きい。線膨張係数は始発から減少し、終結後 2~3 時間でおおよそ一定になった。セメント種類による大きな違いは認められない。

若材齢で線膨張係数が硬化コンクリートより大きいのはコンクリートの構成成分において、まだ自由水が残っている影響が現れたものであり、自由水のほうが骨材、セメント水和物、未反応セメント、空隙などより線膨張係数が大きいためだと考えられる。さらに、始発と終結時点ではまだ弾性係数が発現する前であり、マトリックスとしての剛性が小さいので、体積変化しやすと考えられる。

若材齢での線膨張係数は指数減少関数で表現することとした。表-2 が回帰した結果であり、図-5 に回帰曲線を示す。回帰式は次の形式で表される。相関係数が 0.99 以上であり、線膨張係数の経時変化は他の関数よりも指数減少関数(1)のほうが精度が高いと考えられる。

$$\alpha(t) = A + B \cdot \exp\{-t-t_0/C\} \quad (1)$$

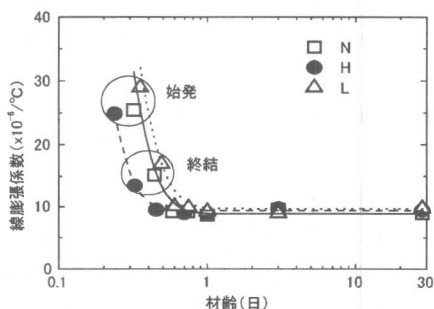


図-5 セメント種類による線膨張係数の経時変化

- $\alpha(t)$: 材齢 t 日における線膨張係数
- A: 28 日以後の線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
- B, C: 定数
- t_0 : 始発時間 (日)

表-2 線膨張係数の経時変化の回帰結果

区分	A	B	t_0	C	R
N	8.88	22.53	0.316	0.107	0.990
H	9.42	15.49	0.236	0.066	0.998
L	9.69	22.17	0.351	0.124	0.997

3. 3 自己収縮ひずみの算定結果に及ぼす線膨張係数の影響

線膨張係数として一般によく用いられる $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の値で仮定する場合と、今回の 28 日材齢の線膨張係数 ($8.88 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) を材齢に関わらず代入する場合と、本実験での測定値を代入する場合を比較した。図-6 は普通ポルトランドセメントを用い、W/C が 25% の結果であり、(a) は 20°C 一定温度養生の場合、(b) は $40 \times 40 \times 40\text{cm}$ のブロック供試体の場合、(c) のほうが始発から 60°C で養生する場合である²⁾。全て打設は 20°C で行った。 20°C 一定温度養生の場合は温度変化があまり大きくないので、若材齢では実測による線膨張係数を代入しても変わらない。しかし、高温の履歴がある場合には自己収縮の算定値は線膨張係数の値によって異なることが認められる。

(b), (c) の場合のコンクリートの温度履歴を図-7 に示す。ブロック養生の場合はコンクリートの水和熱による温度上昇であり、 60°C 養生の場合は始発後に外部から受けた熱のため温度上昇したものであり、温度履歴は異なっている。ブロックの場合にはコンクリートの温度上昇が始発から始まって終結後温度上昇は加速したが、 60°C で養生した場合は始発から急速な温度上昇が現れていた。

図-8 はそれぞれの線膨張係数を用いて計算し得られた温度ひずみを示したものである。図-5 の結果を見ると、線膨張係数は始発から終結までの間に急速に減少し、その後、硬化コン

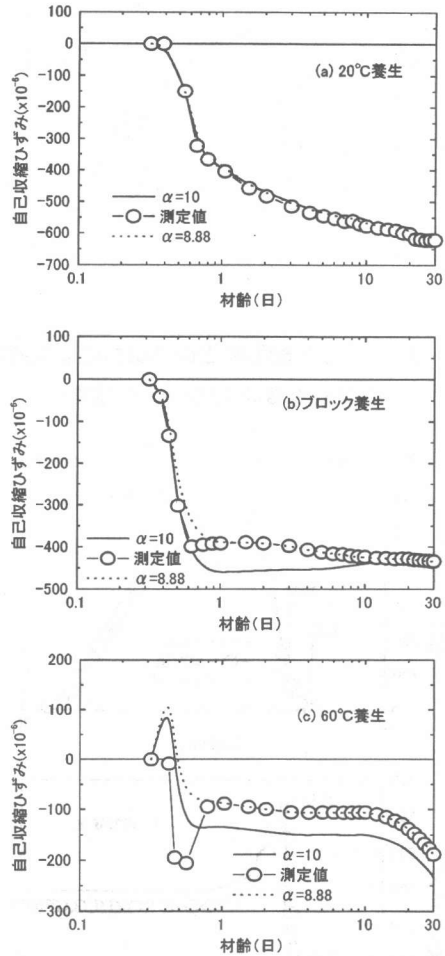


図-6 線膨張係数として測定値と仮定値を代入し算定した自己収縮ひずみ

クリートとしての物性が確定するまで減少し、ほぼ一定値に収束している。ブロック養生供試体の温度変化は終結以降に顕著となっている。従って、ブロック養生供試体における温度ひずみは線膨張係数結果を厳密に反映させた場合と $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と一律に仮定した場合を比べても、得られる算定結果にはあまり差が生じない。しかし、 60°C で養生した場合には始発から急速な温度上昇を示すため、材齢に関わらず線膨張係数を一定と仮定した結果よりも線膨張係数の経時変化を厳密に考慮したほうが温度ひずみははるかに大きかった。図-6 の(c)を見ると、材齢

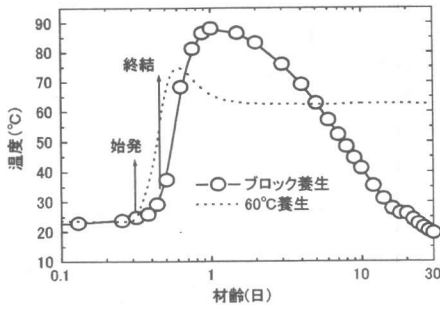


図-7 ブロックと60°C養生の供試体の温度履歴
(始発や終結は20°C一定の結果)

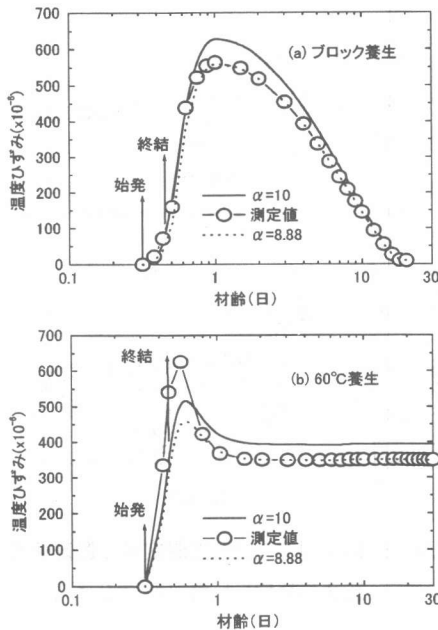


図-8 実測と仮定の線膨張係数による温度ひずみ
(始発や終結は20°C一定の結果)

に関わらず一定の線膨張係数を代入すると初期に膨張ひずみが認められたが、本実験のデータから求めた予測値を用いた場合には、初期の温度ひずみが大きかったので、初期の膨張は現れなかった。ただし、終結後急速に収縮した後、やや膨張し一定になった。初期の膨張が現れないのは適切であったと思われる。終結後(材齢0.5~0.6日程度)に認められた自己収縮ひずみのピークは妥当であったとは考え難く、線膨張

係数の予測値が実際値より大きかったために生じた誤差と考えられる。本実験で提案した予測式は20°Cの凝結時間を用いるものであり、60°Cで養生した場合と実際に違うと考えられる。

すなわち、ブロック供試体のような水和熱によるコンクリートの温度上昇は一般に終結後急速に上がり、本実験で提案した予測式を使っても良いと思われるが、打設後外部から熱が加えられてコンクリート温度が上昇した場合、線膨張係数の経時変化が急速であり、今回の実験で得られた回帰式と異なる可能性もあるので、自己収縮ひずみの算定にあたっては、線膨張係数の経時変化を高精度に追跡する必要があると考えられる。

4. まとめ

- 1) 供試体の寸法を小さくし、温度変化速度を上げることにより、自己収縮のならびに供試体に発生する内部応力による影響を小さくし、若材齢における高強度コンクリートの線膨張係数をより正確にとらえることができた。
- 2) 始発から終結間の極若材齢における線膨張係数は、硬化コンクリートより大きく、終結後一定になったことが認められた。線膨張係数の経時変化は指数減少関数で予測ができた。
- 3) 自己収縮ひずみの算定に線膨張係数で実測値と材齢に関わらず一定の仮定値を代入すると、コンクリートの温度履歴によっては、自己収縮ひずみの算定結果に大きな影響を及ぼす場合があると考えられる。

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) 丁海文, 河野広隆, 渡辺博志, 鈴木雅博: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1117-1122, 1999