

論文 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

楊 楊*1・佐藤良一*2・田澤栄一*2

要旨:本論文は、水結合材比 25%及び 35%の高強度コンクリートを対象とし、硬化過程における線膨張係数について実験的に検討したものである。自己収縮を抑制し、温度変化ひずみを精度よく検出するために、-1~5℃の低温度下の範囲で温度変化を与える方法に着目し、線膨張係数を求めた。さらに、20℃恒温養生と準断熱養生をした高強度コンクリートに対し、この線膨張係数を用いて温度ひずみと自己収縮ひずみを分離するとともに、自己収縮の温度依存性を検討した。

キーワード:高強度コンクリート, 若材齢, 線膨張係数, 水和抑制, 自己収縮

1. はじめに

コンクリートの体積変化に関する研究において、ひずみ成分の検出は重要なことである。自己収縮及び乾燥収縮ひずみは、普通、全ひずみから、熱膨張係数を一定値に仮定して求めた温度ひずみを差し引くことにより算定されている。これは若材齢において物性値が急激に変化する高強度コンクリートに対しては必ずしも適当ではないと考えられる。若材齢における線膨張係数は硬化した段階の場合より大きいと指摘もされている^{1), 2)}。しかし、硬化過程にある高強度コンクリートでは、水和熱による温度ひずみが生じると共に自己収縮が急激に進行する。そのため、常温環境であっても線膨張係数を直接測定することは困難である³⁾。

そこで本研究は、セメントの水和反応を抑制するために、異なる若材齢において-1~5℃の範囲の温度変化を与え、高強度コンクリートの若材齢時の線膨張係数の経時変化とその定量化を目的とした。さらに、20℃恒温養生と準断熱養生の高強度コンクリートに対し、この線膨張係数を用いて温度ひずみ、自己収縮ひずみを分離するとともに、自己収縮に及ぼす温度の影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 材料及び配合

使用した高強度コンクリートの材料及び配合を表-1及び表-2に示す。

表-1 使用材料

使用材料	仕様
セメント C	普通ポルトランドセメント; 比重: 3.14; 比表面積: 3220 cm ² /g
シリカフ ューム SF	比重:2.20; 比表面積: 200000 cm ² /g (Blaine 値);
高炉スラ グ BS	比重:2.90; 比表面積: 6000 cm ² /g (Blaine 値);
細骨材 S	相模川水系川砂; F.M.:2.97; 表乾比重:2.63
粗骨材 G	青梅産硬質砂岩碎石 F.M.:6.73; 表乾比重:2.66
高性能 減水剤 SP	ポリカルボン酸エーテル系 と架橋ポリマーの複合体

2.2 冷却開始材齢

4配合のすべてのコンクリート供試体に対して、冷却開始材齢を以下の7種類設定して線膨張係数を測定した。

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科 生産・情報工学専攻 (正会員)

*2 広島大学教授 工学部第4類 (建設系) 工博 (正会員)

表-2 コンクリートの配合

記号	W/B (%)	SF(BS)/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
				W	C	SF	BS	S	G	SP(×B)
C-SF25	25	10	41.0	160	576	64	—	677	985	1.80%
C-SF35	35	10	44.0	165	424	47	—	785	1019	1.80%
C-BS25	25	50	41.0	160	320	—	320	677	986	1.05%
C-BS35	35	50	45.0	167	239	—	239	798	987	1.15%

W/B25% : 9, 12, 16, 20, 24, 72, 168 時間 ;

W/B35% : 10, 13, 16, 20, 24, 72, 168 時間

2.3 実験方法

線膨張係数及び自己収縮ひずみ測定用供試体の寸法は100×100×400mmとした。

(1) 自己収縮

供試体に取り付けた測温機能付埋込型ひずみ計を用いてひずみを測定した。

供試体の変形を拘束しないように JCI 自己収縮研究委員会「セメントペースト、モルタル及びコンクリートの自己収縮及び自己膨張試験方法(案)」を参照して自己収縮測定用型枠と供試体との摩擦を極力小さくした。脱型後アルミ箔粘着テープで供試体の全面にシールした。

準断熱養生の供試体に関しては、恒温養生の供試体と同様に前述の方法で処理した型枠を厚さ150mmの発砲スチロールの断熱箱に設置し、コンクリートを打設した。

打込み後水分の逸散を防ぐため、コンクリートの表面仕上げを行った直後からラップで覆い、さらにその上にアルミ箔粘着テープを貼った。その後、準断熱養生の場合、直ちに蓋を閉めた。

恒温養生の場合、養生マットを掛けた。

(2) 熱膨張係数

線膨張係数供試体の長さ変化は測温機能付高感度変位計(感度:1000×10⁻⁶/mm, 容量:10mm)で計測した。その変位から供試体の長さを用いてひずみを求めた。供試体の温度変化は中央部分の中心部及び中間部に設置した熱電対で測定する。冷却開始まで20℃で恒温養生を行った。

測定装置の概要を図-1に示す。この装置は不凍液の温度制御用温度調節、記録ユニット、ハンディークーラー、ヒータ及び液温を均一する液体循環ポンプより構成され、外形800×800×750mmの断熱槽である。断熱槽内液体温度分布はほぼ均一で、最大温度差0.3℃である。5℃～-1℃の降温また昇温共に約1時間要した。

所定の冷却開始材齢より1時間前から、供試体を脱型して、側面を厚さ0.067mmの耐低温ポリエステルフィルム、端面をアルミ箔粘着テープで全面シールし、継ぎ目にパラフィンで接着して、不凍液の浸入を避けた。処理された供試体をスタンドの設置し、変位計のスピンドルを供試体のチップに接触させる。その後セットし

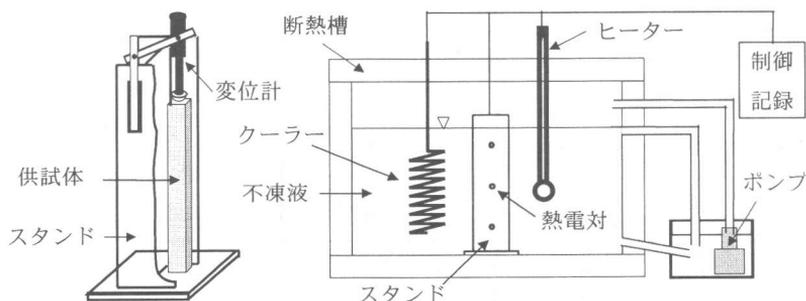


図-1 線膨張係数測定装置の概要

たスタンドを断熱槽に入れ、測定開始する。

(3) 水和反応抑制効果の確認

積算温度の概念より、 -10°C でセメントの水和反応が停止となるが、セメント・コンクリートの中の水が凍結することにより破壊が生じる恐れがあるため、本研究では $-1^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ の低温を採用する。この温度範囲では、空隙中の水が凍結しないし、水和反応速度がかなり遅い。そのため、生じた全ひずみから自己収縮ひずみ成分を無視でき、温度ひずみのみと考えられる。

そこで、低温冷却による水和反応の抑制効果をチェックするため、 $40\times 40\times 160\text{mm}$ のセメントペースト供試体を作製した。チェック方法としては、強熱減量より結合水量を測定し、冷却を受けた供試体の結合水量を 20°C 養生場合の結合水量と比較することにより評価する。

3. 実験結果及び考察

3.1 線膨張係数の温度依存性について

コンクリートの線膨張係数の測定方法はまだ標準化されていないが、測定の温度範囲がほとんどの研究者は氷点以上の常温で行っている^{1), 2), 3)}。しかし、前述のように、若材齢では測定期間中、水和反応が進行するため、温度ひずみに自己収縮ひずみが含まれてしまうこととなる。一方、供試体を $5^{\circ}\text{C}\sim -1^{\circ}\text{C}$ の範囲で温度変化させることより、水和反応抑制できるが、それは常温で得られた線膨張係数と大きな差が生じるか、つまり線膨張係数に及ぼす温度の影響が無

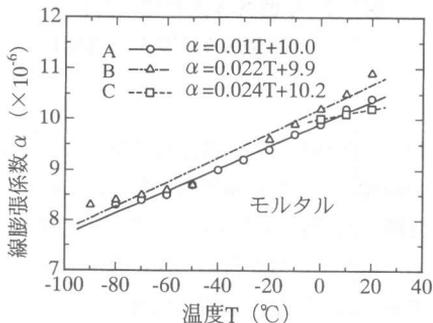


図-2 線膨張係数に及ぼす温度の影響

視できるか疑問がある。

エル・ア・ノビツキ⁴⁾は、セメントモルタルを用いて、 $-100^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ の広範囲での線膨張係数を測定した。その結果を図-2に示す。また、それらのデータに基づいて回帰した直線式も同図に示す。データAは一定の質量までの乾燥状態、Bは空気乾燥状態、Cは飽和状態のモルタルの結果である。図-2より測定温度が 10°C 高くなると、線膨張係数が $0.1\sim 0.24\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 大きくなる。線膨張係数に及ぼす温度の影響はそれほど大きくないと考えられる。よって、本研究では $5\sim -1^{\circ}\text{C}$ の比較的狭い温度範囲で得られた線膨張係数を常温でのものとして評価できるといえる。

3.2 水和反応抑制の効果

$5^{\circ}\text{C}\sim -1^{\circ}\text{C}$ の範囲でセメントの水和反応の抑制効果を確認するため、強熱減量法で結合水量を測定した。用いた供試体は、W/B25%で、シリカフュームでセメント質量10%を置換したペーストである。材齢10, 15, 24, 36, 48時間で、供試体を 5°C から -1°C まで冷却させ、また -1°C から 5°C 昇温させた。冷却開始時と昇温終了時の結合水量の変化率を 20°C の一定温度養生場合の変化率と比較した結果を図-3に示す。

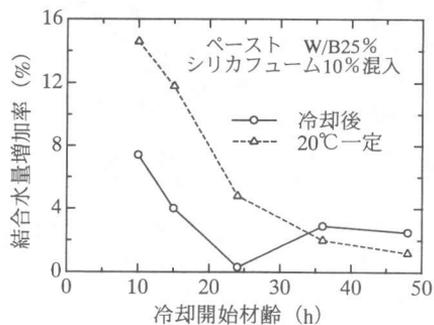


図-3 低温による水和反応の抑制効果

図-3より、熱膨張係数を測定する $5^{\circ}\text{C}\sim -1^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において水和反応がかなり抑制され、セメント水和反応の加速期⁵⁾においても、冷却により、結合水量の増加率は 20°C 一定温度の場

合と比べるとかなり小さくなった。

3.3 線膨張係数

図-4、図-5に各配合の高強度コンクリートのひずみと温度変化の関係を示す。ここに、線膨張係数の測定期間中、温度の影響を考慮するため、材齢はCEB-FIP model code 90に採用された有効材齢で評価することにした。これらの結果はすべて2本供試体の平均値であり、また、温度データは中心部と中央部の平均値とした。

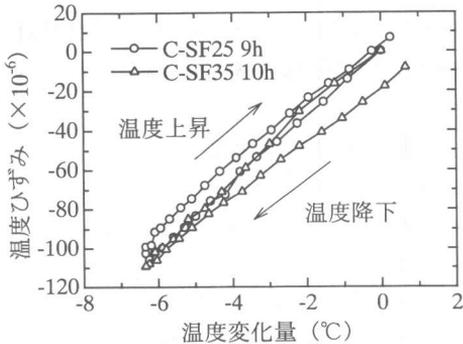


図-4 温度ひずみと温度変化量の関係
(シリカフェーム混入の場合)

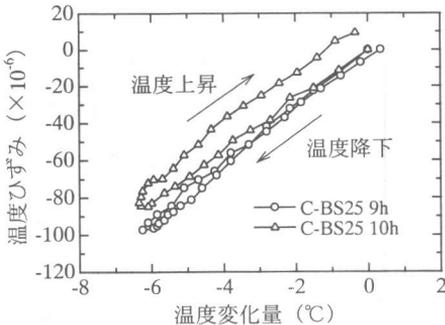


図-5 温度ひずみと温度変化量の関係
(高炉スラグ混入の場合)

いずれのW/B及び混和材料種類の場合においても、ひずみと温度変化とは良好な線形関係を現している。那須⁶⁾は、温度上昇時と降下時において、コンクリートの見掛けの線膨張係数が

異なることの原因として自己収縮の影響と指摘しているが、本研究の手法を用いると、温度降下と上昇の場合においても、C-SF35を除きよく一致しているため、自己収縮の影響は小さく、温度ひずみを精度よく検出できたと考えられる。

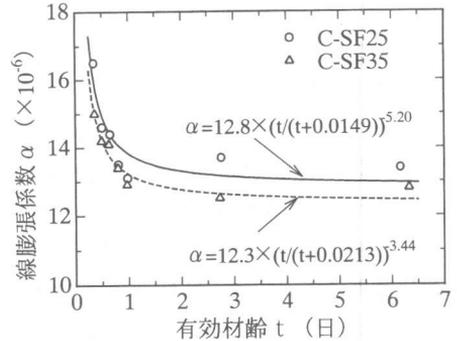


図-6 線膨張係数の経時変化
(シリカフェーム混入の場合)

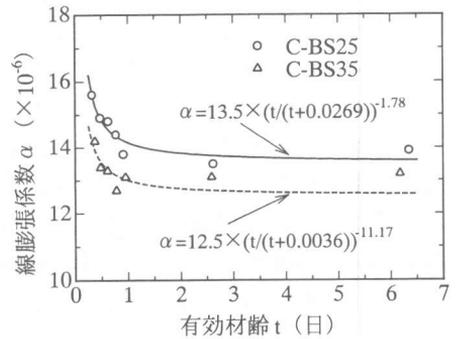


図-7 線膨張係数の経時変化
(高炉スラグ混入の場合)

材齢ごとのひずみと温度変化の関係を最小2乗法で回帰して、線膨張係数が得られる。その結果は図-6、図-7に示す。いずれの配合においても、線膨張係数が材齢と共に急に減少し、有効材齢3日ではほぼ一定値に収束する。これはWittmanら⁷⁾が指摘したように、材齢の増大につれ、硬化体中の結晶体の量が増加するためと考

えられる。W/Bが小さいほど、線膨張係数が大きくなる。シリカフェーム混入の場合と比べると、熱膨張係数は高炉スラグ微粉末混入のほうが若干大きくなる。この理由として高炉スラグを混入したセメント硬化体中に大きな $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 結晶の集合組織や AFt 相がほとんど生成せず、主に Type I の C-S-H 及び C_3A_6 と思われる球状水和物が生成するためである⁸⁾。また、高強度コンクリートにおいて、収束した線膨張係数の値は通常のコンクリートの設計値 $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ より大きい、これはペーストの量が大きいためと考えられる。図-6、図-7に回帰した線膨張係数と材齢の関係式も併せて示す。

3.4 自己収縮ひずみ

従来の設計値の線膨張係数を用いて、全ひずみから温度ひずみ分を差し引き、 20°C 一定温度養生と準断熱養生場合の自己収縮ひずみを求めた。また線膨張係数の経時変化を考慮し、3.3節で得られた線膨張係数と有効材齢の回帰式を用いて、自己収縮ひずみと温度ひずみを分離した。図-8～図-11にそれぞれシリカフェーム混入、W/B25%、35%および高炉スラグ混入、W/B25%、35%のコンクリートの自己収縮ひずみ及び温度の経時変化を示す。 20°C 養生の場合、一定の線膨張係数で得られた自己収縮ひずみは経時的に変化する線膨張係数で求めたものとほとんど重なっているため、それらの図には、一定の線膨張係数を用いた結果のみ示した。

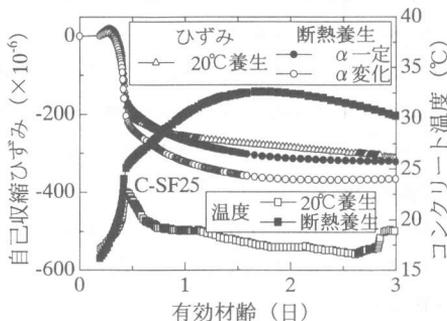


図-8 自己収縮ひずみの経時変化

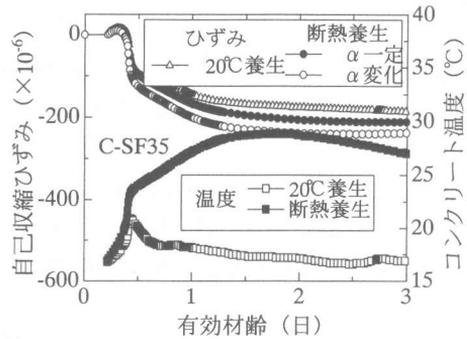


図-9 自己収縮ひずみの経時変化

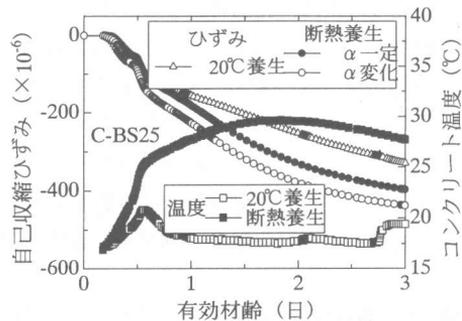


図-10 自己収縮ひずみの経時変化

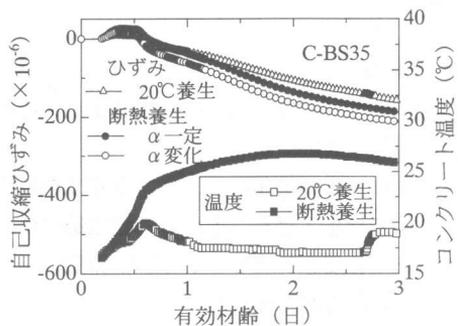


図-11 自己収縮ひずみの経時変化

準断熱養生の場合では、一定の線膨張係数(α 一定)と経時変化する線膨張係数(α 変化)を用いた。

20°C 養生の場合と準断熱養生の場合と共に

W/B が小さいほど、自己収縮ひずみが大きい。しかし、シリカフェーム混入の場合、いずれのW/Bにおいても、準断熱養生により、有効材齢2日になると、自己収縮がほぼ収束となる。これに対して、高炉スラグ混入の場合、自己収縮はまだ速く進行している段階である。これは、結合材中の高炉スラグの水和反応はポルトランドセメントよりも温度依存性が大きいためと考えられる。

α 一定と α 変化でそれぞれ得られた準断熱養生の自己収縮ひずみと20°C養生の自己収縮ひずみと比較すると、準断熱養生のほうが大きい。本研究での完全な断熱と言えない条件であっても、ひずみの差は、有効材齢2日において α 一定の場合、ケース C-SF25, C-SF35, C-BS25, C-BS35 がそれぞれ28, 31, 78, 20×10^{-6} である。これに対して α 変化の場合、それぞれ82, 65, 127, 58×10^{-6} であった。高強度コンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と一定の値を用いた場合、若材齢の自己収縮ひずみを過小評価となる。

図-8～図-11に関する自己収縮ひずみの経時変化はすべて有効材齢で整理したため、以上の考察より、本研究に用いた配合及び混和材料の範疇には、自己収縮の温度依存性を有効材齢で表現できないと考えられる。

4. 結論

本研究の範囲にて得られた結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 水和反応の抑制より、温度ひずみを精度よく検出できることから、硬化過程にある高強度コンクリート線膨張係数の測定方法の提案を行った。
- 2) 硬化過程において、高強度コンクリートの線膨張係数は若材齢で大きく、材齢とともに減少し、有効材齢3日以後一定値に収束する。
- 3) 通常の線膨張係数 10×10^{-6} を用いて求めた準断熱場合の収縮は最大20%自己収縮を過小評価する。

- 4) シリカフェーム及び高炉スラグ微粉末を混入した場合、温度履歴を受けた自己収縮ひずみを有効材齢で評価できない。

本研究は第一著者が広島大学の研究指導委託学生の際にとりまとめたものである。

参考文献

- 1) 山川秀次, 中内博司, 喜多達夫, 大沼博志 : コンクリートの熱膨張係数に関する一考察, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.8, pp.313-316, 1986.6
- 2) 小山智幸, 松藤泰典 : セメントモルタルの硬化初期における線膨張係数の経時変化, コンクリート工学年次講演論文集, Vol.16, No.1, pp.687-688, 1994.6
- 3) Bj ϕ ntegaard, Φ . and Sellevold, E. J. : Thermal Dilation-Autogenous Shrinkage : How to Separate, Proceedings of the International Workshop Organized by JCI : Autogenous Shrinkage of Concrete, E FN SPON, pp.245-256, 1999
- 4) エル・ア・ノビツキー, イ・ゲ・コジエブニコフ : 低温度における材料の熱物理的性質, 日・ソ通信社, pp.183-190, 1976.11
- 5) 反応モデル解析研究委員会 : 報告書(I), 日本コンクリート工学協会, pp.18-24, 1996.5
- 6) 那須清吾 : 低発熱型コンクリートの温度応力ひび割れ特性, 本四技報, Vol.18, No.69, pp.5-7~5-18, 1994.1
- 7) Wittmann, F. and Lukas, J. : Experimental Study of Thermal Expansion of Hardened Cement Paste, Materials and Structures, Vol.7, No.40, pp.247-252, 1974.7-8
- 8) 反応モデル解析研究委員会 : 報告書(I), 日本コンクリート工学協会, pp.58-61, 1996.5