

論文 超高強度コンクリートの若材齢線膨張係数に関する研究

寺本 篤史^{*1}・宮治 友也^{*2}・丸山 一平^{*3}・鈴木 雅博^{*4}

要旨：超高強度コンクリート部材の内部応力を予測するには自己収縮を適切に評価する必要がある。若材齢の線膨張係数の精度よい測定が必要となる。本研究では、超高強度コンクリートを模擬した供試体において、温度履歴及び骨材量をパラメータとし若材齢における線膨張係数を測定した。その結果、線膨張係数は材齢約 20 h まで減少傾向を示し、そののち増加傾向を示した。線膨張係数の測定値を用いて抽出した自己収縮は、線膨張係数を $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ とした結果と比べ、温度履歴下において最大 360μ 大きくなることが分かった。また、高温履歴を経過したコンクリートの線膨張係数は、有効材齢で評価できない可能性が示された。

キーワード：超高強度コンクリート、線膨張係数、若材齢、高温履歴、温度依存性

1. はじめに

水結合材比 15%の超高強度コンクリート(UHSC)は単位セメント量が大きく、水和発熱に起因した温度膨張が発生し、同時に自己乾燥に起因した自己収縮量も大きいことが知られている。これらの性状は、ひび割れを誘発する可能性があり、高耐久性を期待する超高強度コンクリートにおいて大きな問題となる。これらを定量的に評価するためには、自己収縮ひずみと温度ひずみの定量分離が重要である。特に、線膨張係数の時間依存性を考慮した場合と、そうでない場合では高温履歴を経るなかで、大きな差異を生じることが報告されている¹⁾。しかし、この報告では水和反応を抑制するため、 $-1 \sim 5^\circ\text{C}$ の範囲で実施しており、シリカフュームの高温時での反応活性²⁾が伴うが、高温履歴下での線膨張係数の検討は実施していないのが現状である。

本研究では、実部材に生じた水和熱による温度上昇³⁾を模擬した温度履歴を与えた状態で線膨張係数の測定を実施し、検討を行った。

また、若材齢の線膨張係数測定は、自己収縮が同時に進行するため、測定時間を極力短くす

る必要がある。しかし、急激な温度変化は供試体内に温度分布を発生させるため、適切な温度ひずみを計測ができない課題が生じる。そこで本研究では、温度分布を極力小さくするため、厚さ 10mmの供試体を対象に測定を試みた。そのため、超高強度コンクリートを模擬した粗骨材最大寸法 $G_{\max} = 5 \text{ mm}$ のモルタル供試体とせざるを得ず、骨材は体積比で管理した。また、粗骨材含有量が線膨張係数に与える影響についても併せて検討を行った。

2. 実験概要

2.1 材料及び調合

今回使用した材料及び調合を表-1、表-2

表-1 使用材料

種 類	産 地 ・ 性 質
セメント	シリカフュームプレミックスセメント：シリカフューム (SiO_2 :94.8%) 置換率 10%, ベースセメント：低熱ポルトランドセメント (C_3S :29.1%, C_2S :50.1%, C_3A :4.3%, C_4AF :9.6%), 密度 3.08 g/cm^3 , 比表面積 $5600 \text{ cm}^2/\text{g}$
粗骨材	盛岡産(閃緑岩碎石)：表乾密度 2.95 g/cm^3 , 吸水率 0.48%
細骨材	秋田産(川砂)：表乾密度 2.57 g/cm^3 , 吸水率 2.62%
混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤, 消泡剤

*1 名古屋大学 工学部社会環境工学科 (正会員)

*2 名古屋大学 工学部社会環境工学科

*3 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 准教授 博(工) (正会員)

*4 (株)ピーエス三菱 技術本部技術研究所材工グループ グループリーダー 工修 (正会員)

に示す。水結合材比は全て 15%，骨材量はそれぞれ体積比で 49 %（SF-15C49），25 %（SF-15C25），0 %（SF-15P）とし，高温履歴下での線膨張係数測定にはペースト供試体として SF-15P を，模擬コンクリート供試体として SF-15C49 を用いた。

2.2 供試体寸法と測定装置

線膨張係数及び自己収縮ひずみ測定用供試体は、寸法を $10 \times 100 \times 400\text{mm}$ ， $G_{\text{max}} = 5\text{mm}$ とし，各条件につき 1 体作製した。また，供試体中央部と端部に熱電対を設置して温度履歴を測定するとともに，変形をレーザー変位計（精度 1/2000）によって測定した。本研究で用いた測定装置を図－1 に示す。型枠には熱伝導性に優れた銅板を用い，凹部には供試体との摩擦を減らすためテフロンシートを貼り付けた。その上にポリエステルフィルムで封緘した供試体を設置し，銅板型枠内に温度制御を行った水を流すことで供試体の温度制御を行った。銅板型枠は厚さ 50mm の断熱材で覆い，外部との熱交換を極力少なくした。

2.3 測定方法及び線膨張係数算出方法

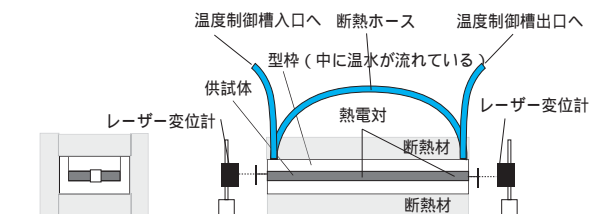
線膨張係数は，温度変化量と温度ひずみから最小 2 乗法で回帰して求めた。本研究では 20°C 一定条件（以下 20°C 条件）と最高温度 65°C の模擬水和熱条件（以下 65°C 条件）の 2 種類のベースとなる温度履歴に， 20°C 条件では材齢 3h から 4 時間おき， 65°C 条件では所定材齢（6, 11, 16, 21, 27, 31, 38, 54, 69, 91, 111, 130h，以下随時－図－5 参照）で，Step1) $+5^\circ\text{C}$ の温度上昇，Step2) -5°C の温度降下（もとの温度），Step3) -5°C の温度降下，Step4) $+5^\circ\text{C}$ の温度上昇からなる 4 ステップの温度制御を与えた。昇温・降温速度は， $0.2^\circ\text{C}/\text{min}$ である。

UHSC は若材齢で急激に自己収縮が進行するため，温度ひずみのみを取り出すことができない。図－2，図－3 に SF-15C49, 65°C 条件における測定結果の一部を示す。図－2 は材齢 11h で自己収縮の影響が顕著に現れた場合，図－3 は材齢 111h で高温履歴もほぼ完了し，自己収縮の影響

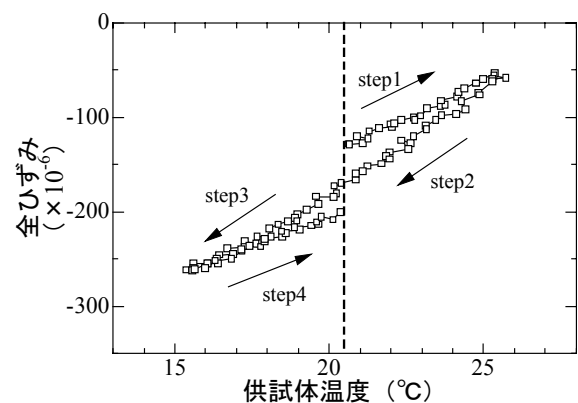
表－2 調合

調合記号	水セメント比 W/C	単位量(kg/m^3)				減水剤 SP/C (%)	消泡剤 D/C (%)
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
SF-15P	0.15	316	2108	0	0	1.0	0.2
SF-15C49	0.15	161	1074	456	926	1.0	0.2
SF-15C25	0.15	237	1580	233	472	1.0	0.2

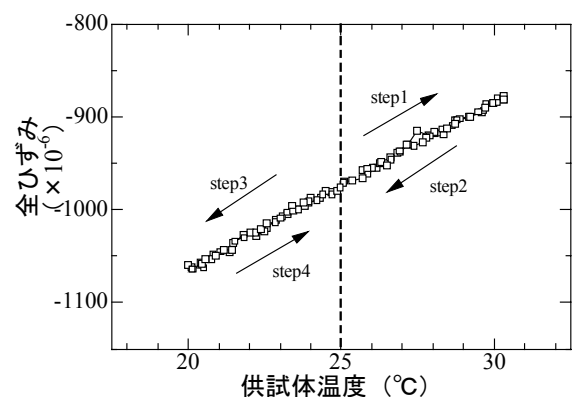
※ S P 及び D は W に含む



図－1 測定装置



図－2 温度ひずみと供試体温度の関係
（材齢 11 h）



図－3 温度ひずみと供試体温度の関係
（材齢 111 h）

が比較的小さい場合である。本研究では，自己収縮は Step1 と Step2 の区間，Step3 と Step4 の区間でそれぞれ同様の傾きで線形に進行すると仮定し，昇温過程と降温過程（例えば Step1

と Step2) の平均を取ることによって自己収縮の影響をキャンセルし、線膨張係数を算出した。

また、本研究では、データのばらつきが少なくなるよう配慮し、 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ の温度変化の範囲内で温度変化の端点 0.5°C 分を削除し、線形性の高い部分の値をもとに線形回帰を行った。ここで参考として、上記の作業を行わず、Step1 から Step4 のデータ全体について線形回帰を行って得られた線膨張係数の履歴を図-4 に示す。算出方法の違いにより、最大で $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の差異が生じ得ることが確認された。図-4 の全体的な傾向より、本研究で示される線膨張係数は、 $\pm 1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度の差異が算出方法の差異により生じうることをここに付記する。

温度変化量については、供試体中央部と端部に埋め込まれた 2 つの熱電対の平均値を用いた。

3. 実験結果及び考察

図-5 (B) (C) (D) (E) に本研究で得られたヤング率、線膨張係数、温度ひずみと自己収縮ひずみからなる全ひずみ、線膨張係数を仮定して全ひずみから温度ひずみを引くことによって得られた自己収縮ひずみをそれぞれの温度履歴 (A) と共に示す。なお、ヤング率については ϕ 5-10 供試体 3 本を測定し平均したものである。

3.1 線膨張係数

線膨張係数は、いずれの条件でも測定開始直後から硬化に伴い急激な減少が見られる。この現象はこれまでも数例報告されている^{1) 4) 5)}。

65°C 条件では温度上昇が始まる 12 h から 21 h の間は、一定値を示すが、その後供試体温度が 40°C 前後に達する材齢 21 h から急激な上昇が確認できる。また、この傾向は模擬コンクリート供試体で顕著であった。これらの現象の原因については、有効材齢を用いた考察を後述する。

また、材齢 50 h 前後から、 20°C 条件では漸増傾向、 65°C 条件では漸減傾向がみられる。Meyers ら⁵⁾ の研究によると、線膨張係数は相対湿度に依存し 70% 前後に最大値を取る。すなわち、 20°C 条件では水和反応による自己乾燥によって相対

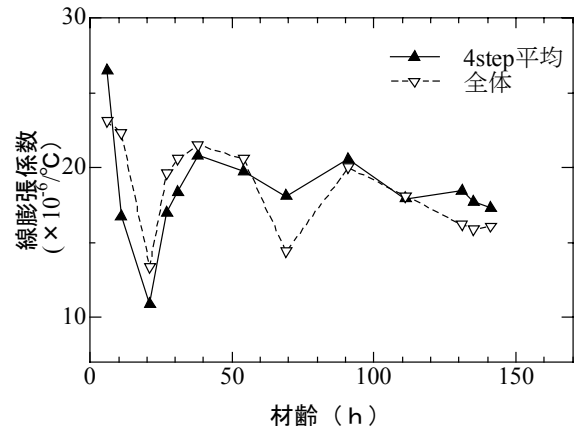


図-4 線膨張係数の算出方法の違いによる差異

湿度が漸減し、70%に近づくにつれ線膨張係数は増加するが、 65°C 条件では、シリカフェームの反応活性により材齢 50 h 以前に急激に自己乾燥が進むため、相対湿度 70% を通り越し、その後もある値に収束するまで減少しつづけるため、それに伴い線膨張係数も減少するという可能性が考えられる。自己収縮ひずみ算出を目的とし、以上の傾向を踏まえた近似式を以下に記す。式

(1) は 20°C 条件及び 65°C 条件の $t < t_0$ 域、式 (2) は 65°C 条件の $t \geq t_0$ 域を表わす。ただし、式 (1) 及び (2) の適用範囲は $0(\text{h}) < t < 170(\text{h})$ とする。

$$t < t_0 \quad \alpha(t) = a \cdot \exp(b \cdot t) + c \cdot \ln(t) + d \quad (1)$$

$$t \geq t_0 \quad \alpha(t) = e \cdot \ln(t - 21) + f \cdot t + g \quad (2)$$

t : 材齢 (h)

$\alpha(t)$: 材齢 t における線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

t_0 : 近似式切替材齢 (h)

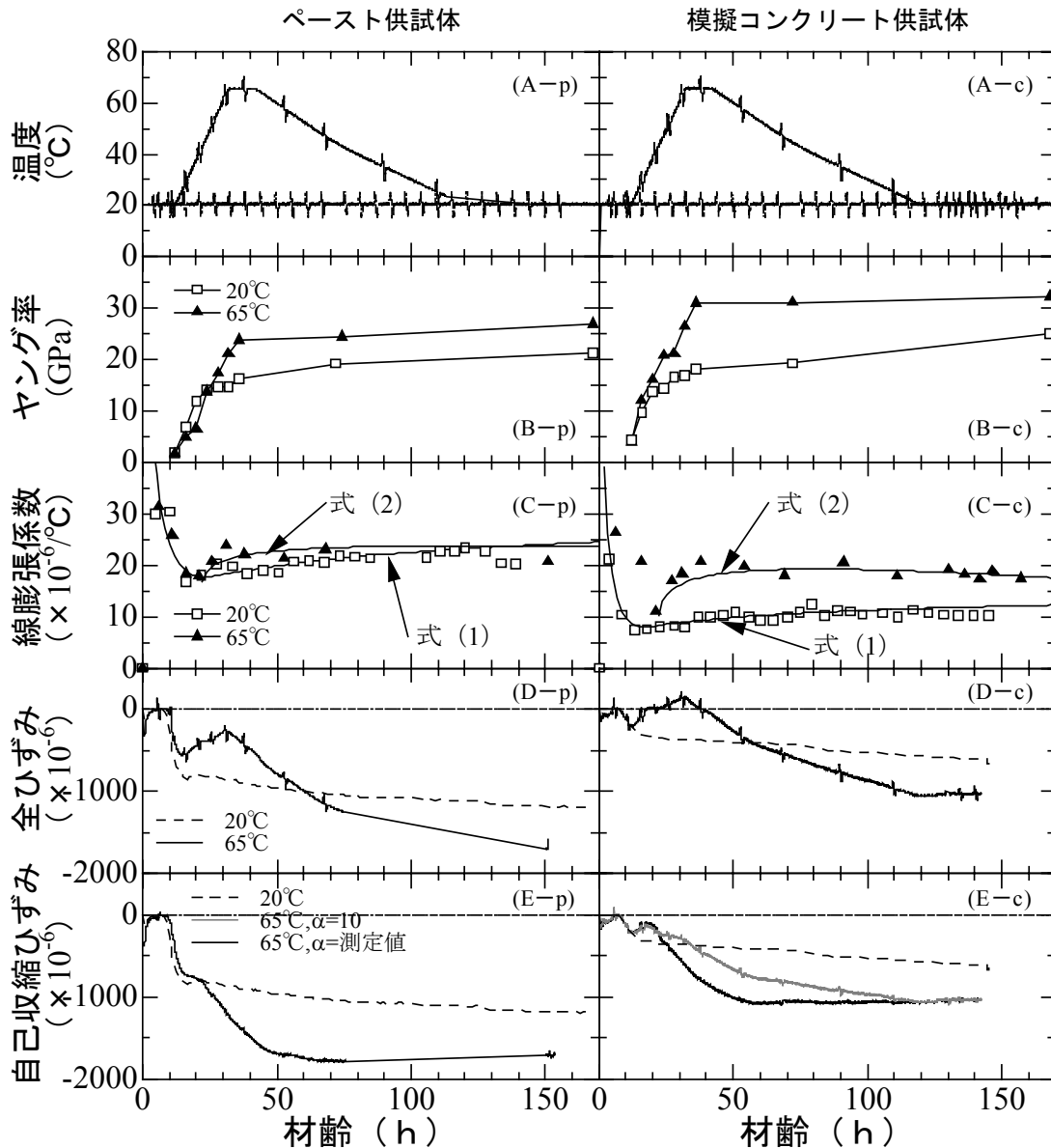
$a-g$: 定数(表-3)

表-3 定数

供試体種類	$t_0(\text{h})$	a	b	c	d	e	f	g
ペースト	22.88	70	-0.19	3.8	5	2	-0.02	17
模擬コンクリート	21.58	60	-0.3	2	2	3	-0.05	11

3.2 自己収縮ひずみ

温度ひずみと自己収縮ひずみからなる全ひず



図－5 若材齢における諸物性の経時変化

みを図－5 (D) に示す。65℃条件にみられる材齢 30 h をピークとする上昇域は、供試体温度の上昇による膨張が原因であるが、その後の温度降下に伴い急激に収縮し、最終値では 20℃条件を下回る結果となった。この収縮差は、高温条件下でのシリカフュームの反応活性により、20℃供試体よりも多くの水分が消費されたことに起因するものと思われる。

本実験での測定値と、一般にコンクリートの線膨張係数の値としてよく使用される $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ を用いて自己収縮ひずみを算出したものを

図－5 (E - c) に示す。これによると、65℃条件では、供試体温度が 50℃を越えた辺りから急速に収縮が進行し、材齢 50 h 前後でほぼ一定値に落ち着く。図－5 (B) に示すヤング率の挙動からも 65℃条件では、材齢 36 h 以降強度の増加が見られないことから、材齢 50 h 以降、水和反応が非常に緩慢になっていると考えられる。本実験における測定値を用いた自己収縮ひずみは想定された現象を良く表現している。加えて、線膨張係数として $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ を用いた場合には、材齢 50 時間あたりで、最大 360 μ 程度の自己収縮

ひずみの過小評価がなされた。

3.3 有効材齢による評価

20℃条件と65℃条件で、諸物性が別挙動を示したことに關して、CEB-FIP modelcode90 に採用された有効材齢式⁷⁾を用い検討を行う。

図-6 (A) (B) にヤング率、線膨張係数を有効材齢で評価したものをそれぞれ示す。これによると、ペースト供試体では20℃条件、65℃条件に大きな違いは見られない。一方模擬コンクリート供試体では両者はまったく別の挙動を示しており、高温履歴を与えた模擬コンクリート供試体に関しては有効材齢による評価が妥当でないと考えられる。すなわち、模擬コンクリート供試体におけるヤング率及び線膨張係数の上昇は、高温履歴による水和反応の促進以外の要因を持つ可能性が高い。

丁ら⁴⁾は普通セメントを用いて20℃～60℃の範囲で線膨張係数の測定を行っているが、線膨張係数に温度依存性は見られないとの報告を行っている。本研究でも、温度降下後の線膨張係数が高止まりしていることから線膨張係数に温度依存性はほとんどないものと考えられる。

20℃条件と65℃条件での諸物性の挙動の差異は、シリカフュームの反応活性によって生じた硬化体が20℃のものと異なる物性を持つことに起因するものと考えられる。ペースト供試体と

模擬コンクリート供試体が別傾向を示したことについては、骨材の有無が原因と思われるが、詳細は不明であり、今後の検討課題としたい。

3.4 骨材量依存性

同じ20℃条件でもペースト供試体と模擬コンクリート供試体では別の挙動を示すことは図-5からも明らかである。そこでここでは、コンクリート1m³における骨材の体積比をパラメータとして、線膨張係数における骨材量依存性を検証した。測定結果を図-7に示す。またレーザー変位計による計測では、粗骨材最大粒径 $G_{max}=5mm$ としたが、骨材の粒径による線膨張係数の影響を確かめるため、使用材料及び調合は同じで、寸法が100×100×400mm、 $G_{max}=20mm$ とした供試体を、埋込型ひずみ計によって測定した材齢648時間における線膨張係数を併せて示す。

測定の結果、材齢は異なるものの、ある程度硬化した後の線膨張係数は、骨材の粒径による影響をほとんど受けないことが確認された。

図-7によると、骨材量が増加するほど線膨張係数が減少していることがわかる。これは骨材の線膨張係数がセメントペーストに比べ十分小さいためであり、ここではこの現象を、セメントペーストと骨材における以下の複合則理論に基づき、双曲線である式(3)により評価した。

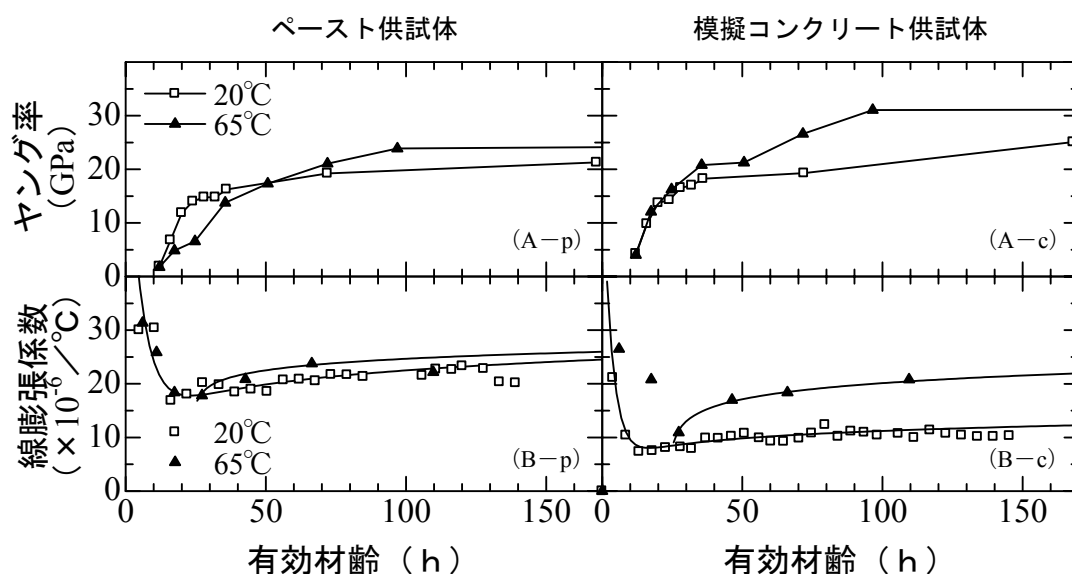


図-6 諸物性の有効材齢による評価

$$\alpha(x) = \frac{1}{\frac{1-x}{\alpha_p} + \frac{x}{\alpha_a}} \quad (3)$$

ここに、 x ：骨材量比、 $\alpha(x)$ ：骨材量比 x における線膨張係数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)、 α_p ：セメントペーストの線膨張係数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)、 α_a ：骨材の線膨張係数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)である。

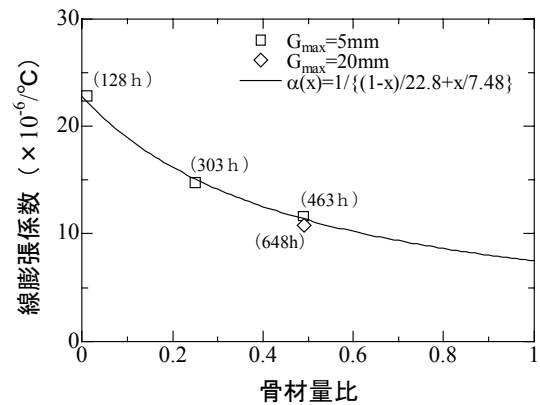
式(3)によると、骨材量比 1、すなわち骨材そのものの線膨張係数は $7.48 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ となり、妥当な値と考えられる。川口⁸⁾は、線膨張係数は骨材種類に影響を受けることを指摘しており、骨材と線膨張係数の関係については、今後も更なる検討が必要である。

4. 結論

本研究では、混和材としてシリカフュームを用いた水結合材比 0.15 の模擬コンクリート供試体に、実部材が受ける水和熱を模擬した温度履歴を与えた状態での線膨張係数及び全ひずみの経時変化を測定した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 20℃一定養生では、極若材齢で線膨張係数は大きく減少し、その後漸増傾向を示した。最小値を示す材齢は、自己収縮が急激に増大する時期と一致することがわかった。
- 2) 模擬水和熱温度履歴を与えた場合、途中までは 20℃一定養生と同様の傾向を示すが、供試体温度が 40℃前後に到達した時点から、線膨張係数は上昇を開始し、数時間でピークを迎えたのち漸減傾向を示す。
- 3) 2)の現象について、有効材齢による評価を試みたが、65℃の温度履歴を経た模擬コンクリート供試体で、線膨張係数是有効材齢で評価できないことが明らかとなった。

謝辞：本研究の一部は、平成 18-20 年度文部科学省科学研究費若手研究 A(代表 丸山一平、課題番号：18686045)の補助を受け実施した。



図－7 骨材量と線膨張係数の関係

参考文献

- 1) 楊 楊ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.961-966，2000.6
- 2) 菅又 匠ほか：セメントーシリカフューム系結合材の水和反応と強度発現の関係に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1287-1292，2004.7
- 3) 鈴木雅博ほか：超高強度コンクリートの自己応力に及ぼす温度履歴の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.59，pp.375-382，2005
- 4) 丁 海文ほか：高強度コンクリートの線膨張係数に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.955-960，2000.6
- 5) 小澤満津雄ほか：非接触変位計による若材齢コンクリートの線膨張係数の計測，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.1099-1104，2001.7
- 6) Meyers, S. L. et al.: Thermal Expansion Characteristics of Hardened Cement Paste and of Concrete, Highway Research Board Proceedings, Vol.30, pp. 193-203, 1950
- 7) CEB-FIP, "MODEL CODE 1990 - Material properties", Thomas Telford, 1990
- 8) 川口 徹：コンクリートの熱膨張係数に関する既往の研究成果について，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，pp.15 18，1982.8