

# 人工軽量細骨材を用いた高強度コンクリートの 力学的性質と体積変化

## Mechanical Property and Volume Change of High-Strength Concrete Using Artificial Lightweight Fine Aggregate

谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI  
佐々木 亘 WATARU SASAKI  
樋口 正典 MASANORI HIGUCHI

本論文では、人工軽量細骨材を用いた高強度コンクリートの圧縮強度、ヤング係数、割裂引張強度試験によるひび割れ発生強度、自己収縮および乾燥収縮の試験結果について報告するものである。人工軽量細骨材の置換率（全細骨材に占める人工軽量細骨材の容積比率）は、0、25、50および100%とした。

試験の結果、次のことが明らかになった。1)人工軽量細骨材の置換率が高くなると、コンクリートの強度やヤング係数は低下するが、封緘養生を行ったコンクリートの圧縮強度は、同じ配合であれば、標準水中養生を行ったものと同程度になる傾向がある。2)人工軽量細骨材を用いた自己収縮および初期の乾燥収縮は、普通細骨材を使用したものよりも小さくなるが、長期的な乾燥収縮はそれと同様か大きくなる。

**キーワード：**人工軽量細骨材、高強度コンクリート、強度、収縮

This report describes the test results on compressive strength, Young's modulus, cracking strength by the tests for splitting tensile strength, autogenous shrinkage and drying shrinkage of high-strength concrete containing artificial lightweight fine aggregate(ALFA). The percentage of replacement ratio (sl/s) of the ALFA to fine aggregate was set to 0, 25, 50 and 100%.

As a result of the tests, the followings were obtained; 1)As sl/s increases, the strength and Young's modulus of concrete decrease, but the compressive strength of concrete with sealing curing tends to be more equal to that of concrete with standard curing than that of concrete using normal aggregate. 2) The autogenous shrinkage and initial drying shrinkage of ALFA concrete is smaller than comparing with that of concrete using normal fine aggregate, but long-term drying shrinkage becomes equal or larger.

**Key Words:** Artificial Lightweight Fine Aggregate, High-Strength Concrete, Strength, Shrinkage

### 1. はじめに

高強度コンクリートは高い強度と耐久性を有するため、プレストレストコンクリート（PC）橋への適用により新構造形式の採用や供用年数の延長などを可能にし得る。しかし、水結合材比の低下に伴い、自己収縮が大きくなるのが一般に知られている。また、コンクリートの乾燥収縮は、使用する普通骨材によって大きく異なることが多くの研究<sup>1),2)</sup>で明らかになっているが、著者らは、セメントおよび水セメント比が同一であっても、使用する骨材が異なると、自己収縮も相当に大きくなる場合があることを把握している<sup>2),3)</sup>。このため、最近で

は、PC部材に使用する比較的高い強度域のコンクリートに対しても、膨張材、収縮低減剤あるいは収縮低減剤の成分を含む高性能 AE 減水剤等の収縮低減材料が使用することが増えている。

一方、人工軽量骨材は、その言葉どおり、コンクリートの軽量化を図る目的で開発・普及した骨材であるが、内部に十分に含水した人工軽量粗骨材は、内部養生効果によりコンクリートの自己収縮を低減できることが明らかになりつつある<sup>4),5)</sup>。たとえば、筆者らの一部<sup>5)</sup>は、図-1に示すように、水粉体比が31.3%の人工軽量粗骨材を用いた高流動軽量コンクリートの自己・乾燥収縮ひずみを測定した結果、膨張材（図中のE：使用量）およ

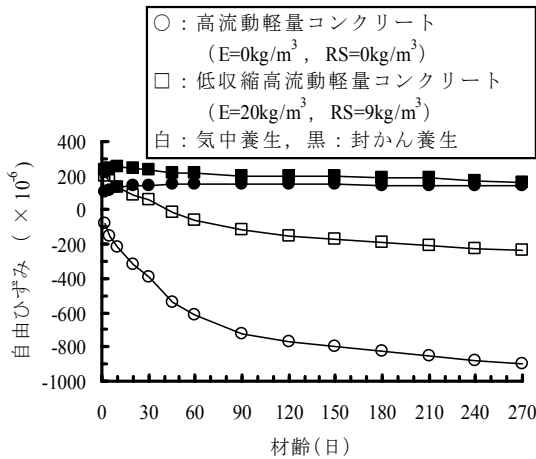


図-1 人工軽量粗骨材を用いた高流動軽量コンクリートの収縮ひずみ<sup>5)</sup>

び収縮低減剤（図中の RS：使用量）の有無によらず、封かん養生では膨張ひずみを生じた状態で持続することを確認した。これは、人工軽量粗骨材の内部に含まれる水がセメントマトリックスに放出することで相対湿度の低下を抑制し、また、初期水和に必要な量を十分に上回る水量を供給することにより、自己収縮ひずみを低減させる働きに起因することを示すものである。事前に十分に含水させた人工軽量粗骨材を用いたコンクリートは、自己収縮の低減を目的に、膨張材や収縮低減剤を使用する必要性はほとんどない。しかし、膨張材や収縮低減剤を使用しない高流動軽量コンクリートの乾燥環境下における収縮ひずみは、材齢 270 日で $-900 \times 10^{-6}$ に達するため、図-1 に示すように膨張材と収縮低減剤を併用すれば、使用しない場合に比べて 1/3 程度に低減できる。

膨張材や収縮低減剤を使用せず、十分に含水した人工軽量骨材の内部養生による収縮低減効果に期待し、細骨材の一部もしくは全部を軽量細骨材で置換したコンクリートの開発を行った。本論文では、PC 部材用高強度コンクリートを対象とし、軽量細骨材の置換率が、コンクリートの力学的性質や体積変化に及ぼす影響を確認した。具体的には、力学的性質として圧縮強度、ヤング係数および割裂引張強度試験で求めたひび割れ発生強度を、体積変化として自己収縮および乾燥収縮の結果を論文に示した。

## 2. 実験概要

### (1) コンクリート条件

コンクリートの使用材料を表-1、配合条件を表-2 に示す。本研究での評価対象は、PC 橋上部構造の現場打ちで多用される、設計基準強度が  $40\text{N/mm}^2$  程度のコン

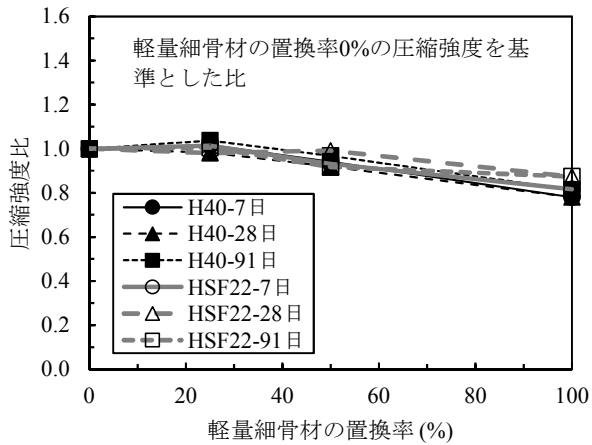
表-1 使用材料

材料	種類 (産地, 物性, 成分)	記号
水	水道水	W
セメント	早強ポルトランドセメント (密度 $3.13\text{g/cm}^3$ )	C
混和材	シリカフェーム (エジプト産, 密度 $2.25\text{g/cm}^3$ , BET比表面積 $15.8\text{m}^2/\text{g}$ )	SF
	山砂(表乾密度 $2.62\text{g/cm}^3$ , 吸水率 $1.87\%$ )と砕砂(硬質砂岩, 表乾密度 $2.61\text{g/cm}^3$ , 吸水率 $1.68\%$ )を容積比4:6で混合	S1
細骨材	砕砂(石灰石, 表乾密度 $2.58\text{g/cm}^3$ , 吸水率 $2.68\%$ )	S2
	人工軽量細骨材 (膨張性頁岩, 表乾密度 $1.87\text{g/cm}^3$ , 吸水率 $14.5\%$ , 含水率 $26.0\%$ )	SL
	砕石 2005(硬質砂岩, 表乾密度 $2.64\text{g/cm}^3$ , 吸水率 $0.96\%$ )	G1
粗骨材	砕石 1305(硬質砂岩, 表乾密度 $2.65\text{g/cm}^3$ , 吸水率 $0.60\%$ )	G2
	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物)	SP1
化学混和剤	高強度コンクリート用高性能減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物)	SP2
	空気量調整剤(変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤)	AE1
	空気量調整剤(ポリアルキレングリコール誘導体)	AE2
	短繊維	鋼繊維 (密度 $7.85\text{g/cm}^3$ , 繊維径 $0.2\text{mm}$ , 繊維長 $22\text{mm}$ 引張強度 $2000\text{N/mm}^2$ 以上)

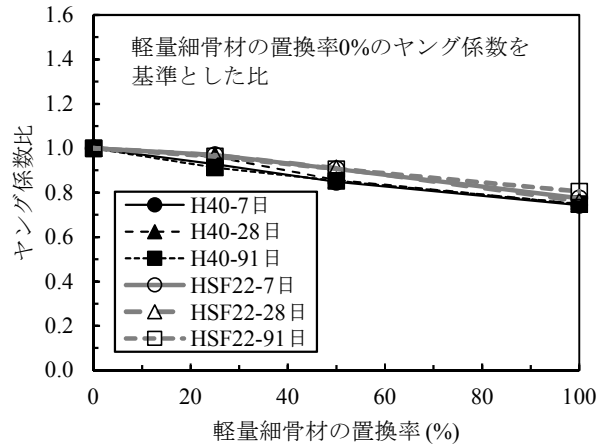
表-2 配合条件

対象	記号	水結合材比 W/B (%)	軽量細骨材置換率 sl/s (%)	鋼繊維混入率 Vf (%)	細骨材率 s/a (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )
現場打ち PC部材	H40	40.0	0	0	43.0	20±2	4.5±1.0	165
	H40SL25		25					
	H40SL50		50					
	H40SL100		100					
高強度プレキャスト PC部材	HSF22	22.0	0	0.5	59.7	22±2	3.5±1.0	185
	HSF22SL25		25					
	HSF22SL50		50					
	HSF22SL100		100					

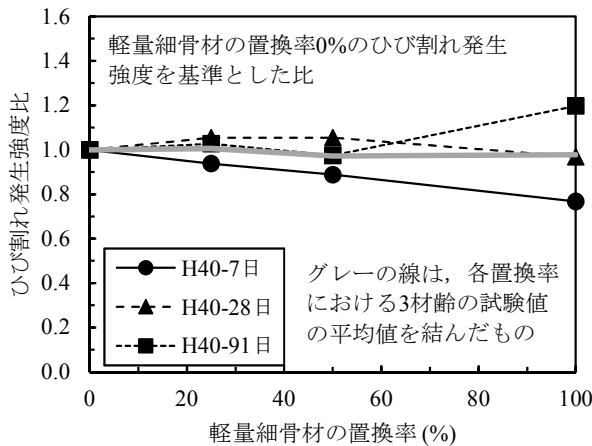
クリート（配合 H40 シリーズと呼ぶ）と、厚さが薄いプレキャスト PC 部材への適用を想定した、設計基準強度が  $80 \sim 100\text{N/mm}^2$  程度の高強度繊維補強コンクリート（配合 HSF22 シリーズと呼ぶ）の 2 種類である。表-1 中の記号の添え字 1, 添え字 2 の材料は、それぞれ、配合 H40 シリーズ, 配合 HSF22 シリーズに使用した。セメントには、いずれも早強ポルトランドセメントを使用し、配合 HSF22 シリーズではシリカフェームをセメントの 10%を置換して使用した。また、配合 HSF22 シリーズで使用した短繊維は、その混入率が 0.5%でも十分に補強効果を発揮できる、微細で、かつ高い引張強度を有する鋼繊維である<sup>6)</sup>。使用した人工軽量細骨材（以下、軽量細骨材）は、膨張性頁岩を主原料とする市販品で、



(a) 圧縮強度比



(b) ヤング係数比



(c) ひび割れ発生強度比

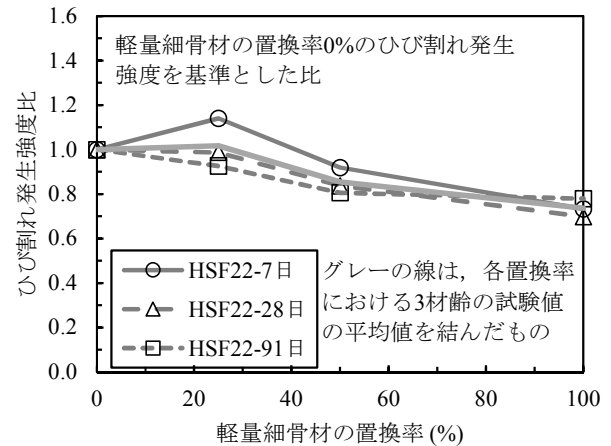


図-2 圧縮強度比，ヤング係数比およびひび割れ発生強度比と軽量細骨材の置換率の関係 (標準水中養生を行った場合)

軽量細骨材の置換率（全細骨材に占める軽量細骨材の容積比率）を，0，25，50 および 100%とした。なお，本論文中で単に置換率と表記した場合には，この軽量細骨材の置換率を指す。

(2) コンクリートの品質に関する試験

本研究では，コンクリートの圧縮強度，ヤング係数，割裂引張強度（ひび割れ発生強度），自己収縮および乾燥収縮の各試験を実施した。

圧縮強度およびヤング係数は，それぞれ，JIS A 1108，JIS A 1149 に準拠して測定した。使用した供試体は円柱供試体（φ100×200mm）で，標準水中養生以外に，乾燥の影響を把握するため，恒温恒湿室（温度 20±2℃，相対湿度 60±5%）内で材齢 7 日まで封緘状態を保ち，その後乾燥させる養生（以下，気中養生）を施した。試験材齢は，7，28 および 91 日である。

割裂引張強度試験は，JIS A 1113 に準拠して実施した。

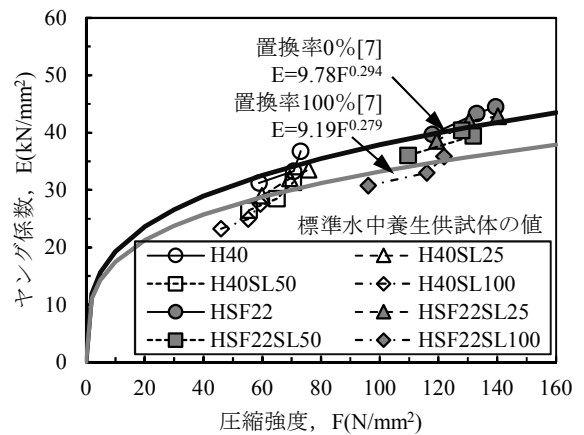


図-3 圧縮強度とヤング係数の関係

養生方法や試験材齢は，前記の圧縮強度と同じである。短繊維補強コンクリートを用いた供試体は，供試体側面の載荷版との接触線箇所にひび割れを発生しても，すぐには破壊に至らず，荷重の持続に伴い，架橋した短繊維が抜出しもしくは破断するまでひび割れが開口して

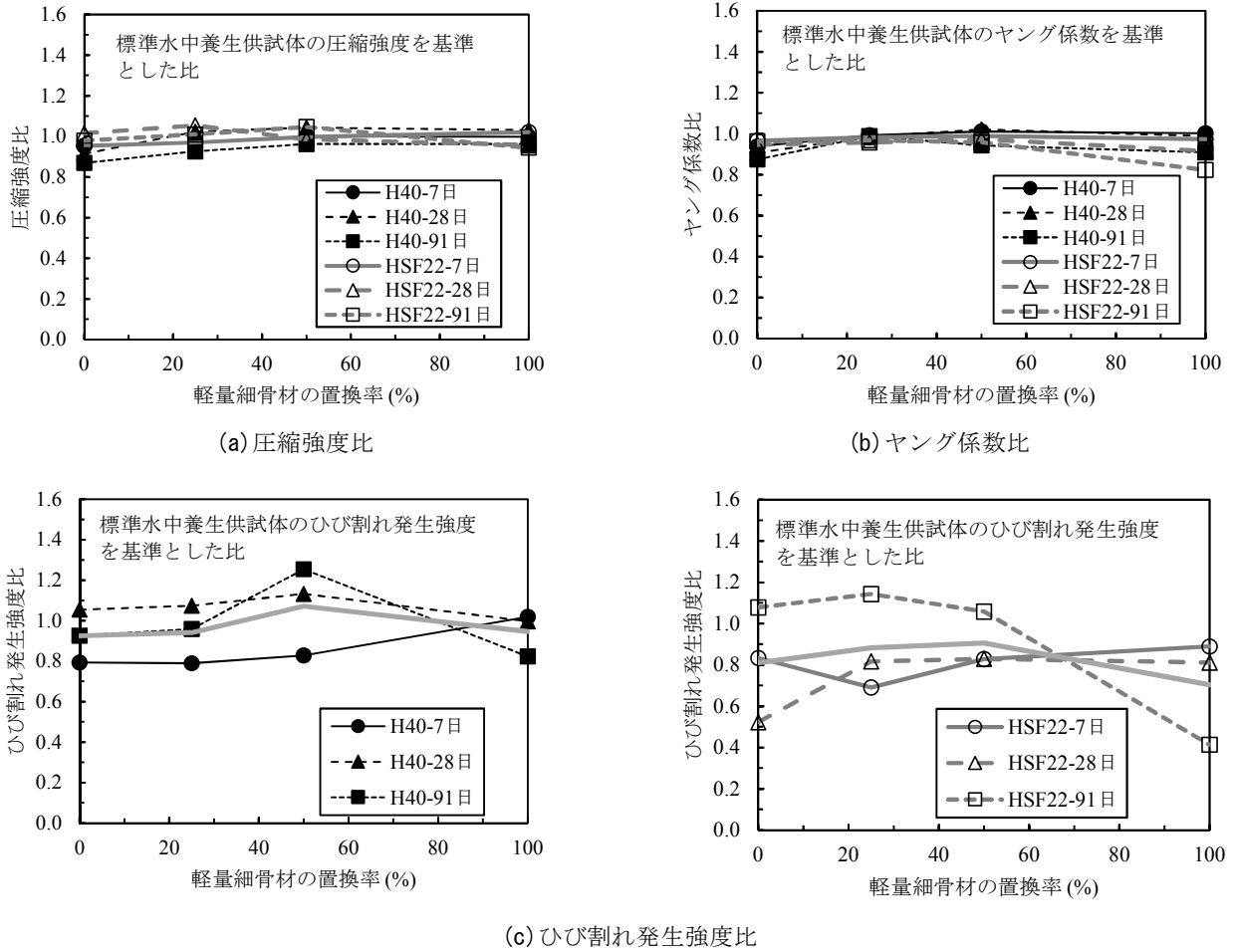


図-4 圧縮強度比，ヤング係数比およびひび割れ発生強度比と軽量細骨材の置換率の関係 (材齢7日まで封緘養生，それ以降に気中養生を行った場合)

いく。

短繊維の種類や混入率によっては，最大荷重は，ひび割れ発生時の荷重よりも高くなる場合がある。しかし，割裂引張強度試験の測定原理は，供試体側面の上下が載荷版とそれぞれ1本線で接触していることが前提であるため，短繊維補強コンクリートでは，最大荷重の読み値から求まる引張強度で評価できない。そこで，本論文では，いずれの配合シリーズを用いた場合にも，供試体の端面にひずみゲージを貼り，計測されたひずみの変化が不連続になった点をひび割れ発生強度として評価することとした。

自己収縮は，公益社団法人日本コンクリート工学会「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」に準拠し，埋込みひずみ計で測定した。乾燥収縮は，JIS A 1129-2 (コンタクトゲージ法) に準じて測定を行った。材齢7日間の水中養生を行った後，前述の恒温恒湿室内で供試体6面を乾燥させた。

### 3. コンクリートの力学的性質

#### (1) 標準水中養生

標準水中養生を行ったコンクリートの圧縮強度比，ヤング係数比およびひび割れ発生強度比を，図-2 に示す。ここで，それらの比は，軽量細骨材の置換率が25，50および100%の試験値を，置換率が0%の試験値で除した値である。

圧縮強度比は，図-2 に示すとおり，いずれの配合シリーズも，軽量細骨材の置換率が25%を超えると1.0よりも低くなる傾向があり，置換率が100%では0.78～0.87の範囲まで低下する。配合 HSF22 シリーズの圧縮強度比は，配合 H40 シリーズに比べて若干低下量が小さい。

一方，ヤング係数比は，軽量細骨材の置換率の増加に伴って低下する傾向があり，置換率が100%では0.74～0.81の範囲まで低下する。配合シリーズの影響も圧縮強度比と同様の傾向を示した。

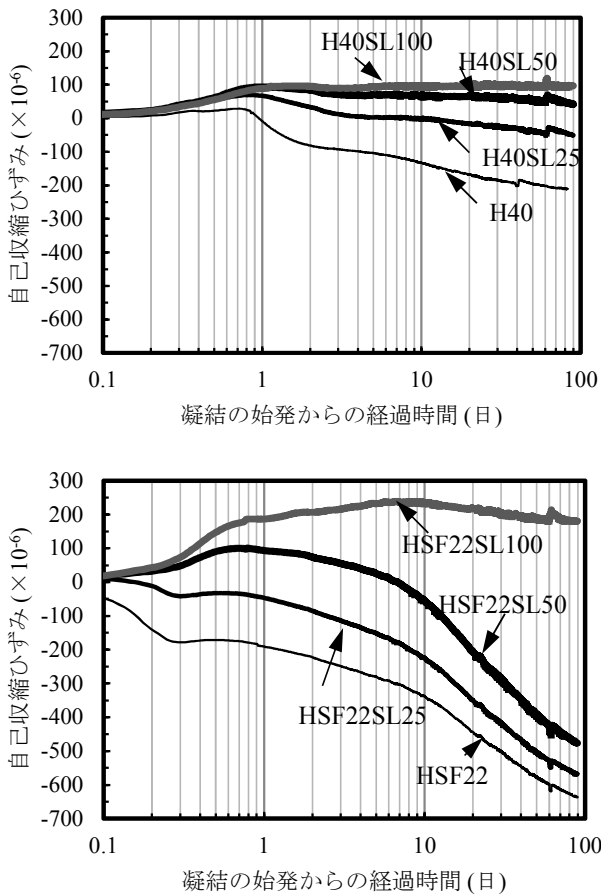


図-5 自己収縮試験の結果

圧縮強度とヤング係数は直線関係にはないので、軽量細骨材の置換率がヤング係数に及ぼす影響を検討する上では、圧縮強度とヤング係数の関係図で確認しておく必要がある。図-3 は、今回の試験結果と、参考として、筆者の一人<sup>7)</sup>が過去に行った軽量細骨材の置換率が0%と100%の圧縮強度とヤング係数の回帰式を示した。使用材料や配合が異なるので完全には一致しないが、過去の試験結果による回帰式は、配合シリーズに関わらず、置換率の影響を把握する上で目安となる。すなわち、いずれの配合シリーズも、軽量細骨材の置換率の増加に伴い、置換率が0%から100%の回帰式の曲線に近づくことが分かる。なお、配合H40シリーズは若干ばらつきが大きく、軽量細骨材の置換率が両者の関係に及ぼす影響は、配合H40シリーズよりも配合HSF22シリーズの方が明確である。

ひび割れ発生強度比は、図-2 に示すように、圧縮強度比、ヤング係数比に比べて材齢ごとに異なる傾向があり、軽量細骨材の置換率との関係を把握しにくい。そこで、図中には、3材齢の試験値を平均し、グレーの線で示した。配合H40シリーズでは、材齢7日のひび割れ発生強度比は、軽量細骨材の置換率の増加に伴い、低下

する傾向が顕著に表れているが、材齢28日と91日のひび割れ発生強度比には低下傾向が認められない。3材齢の平均値でもひび割れ発生強度比の低下は数%である。

一方、配合HSF22シリーズでは、材齢7日のひび割れ発生強度比が他の材齢に比べて高いが、軽量細骨材の置換率が25%を超えると1.0よりも低くなり、置換率が100%では0.75程度まで低下することが分かる。

## (2) 気中養生

軽量細骨材の置換率と圧縮強度比、ヤング係数比およびひび割れ発生強度比の関係を、図-4 に示す。ここで、それらの比は、図-2 に示したものと異なり、気中養生供試体の試験値を、標準水中養生供試体の試験値で除した値である。

圧縮強度比およびヤング係数比は、いずれの配合シリーズも1.0もしくはこれよりも小さくなる傾向がある。配合H40シリーズの圧縮強度比は、材齢7日の場合、軽量細骨材の置換率が0~50%の範囲では置換率が大きくなるほど高くなり、置換率が50~100%の範囲では1.0となる。材齢91日の圧縮強度比と軽量細骨材の置換率の傾向は材齢7日と同様であるが、いずれも材齢7日の圧縮強度比よりも低い。配合HSF22シリーズの場合には、材齢7日では軽量細骨材の置換率が大きいほど、圧縮強度比は高くなる傾向があるが、材齢91日では軽量細骨材の置換率が0~50%の範囲の圧縮強度比は材齢7日より高い値である。

一方、ひび割れ発生強度は、前述のように標準水中養生であってもばらつきが大きい、乾燥の影響が加わると一層傾向が不明瞭になる。ひび割れ発生強度比の3材齢の平均値は、配合H40シリーズでは0.95程度、配合HSF22シリーズでは0.90程度に低下する傾向がある。

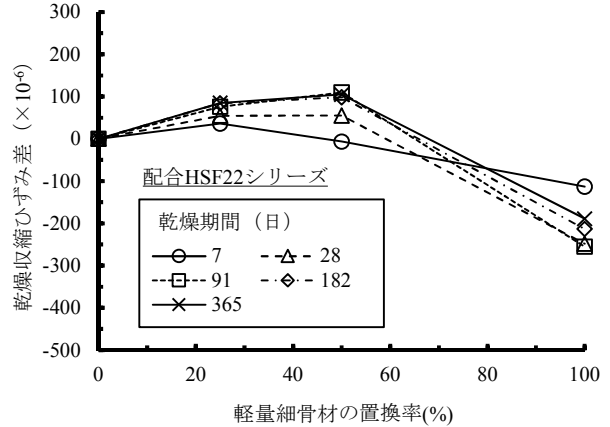
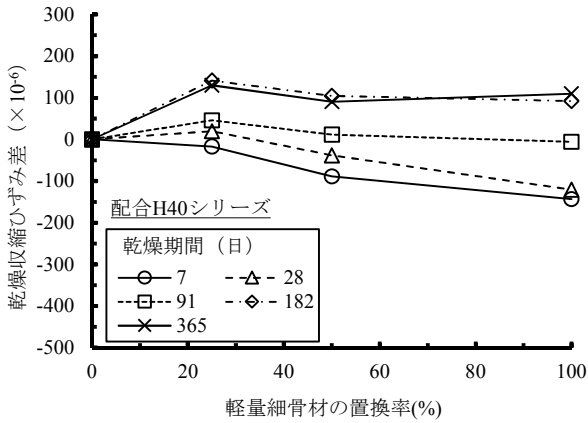
また、ひび割れ発生強度比は、材齢7日では軽量細骨材の置換率が大きいほど、緩やかに高くなる傾向があるが、材齢91日に達すると、材齢7日の値に比べてその置換率50%までは高いが、100%まで高めると低くなる。

## 4. コンクリートの体積変化

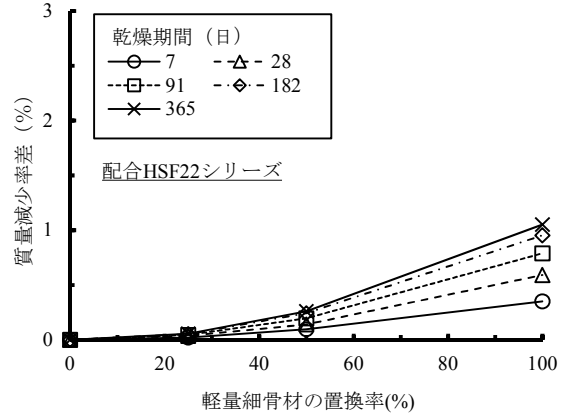
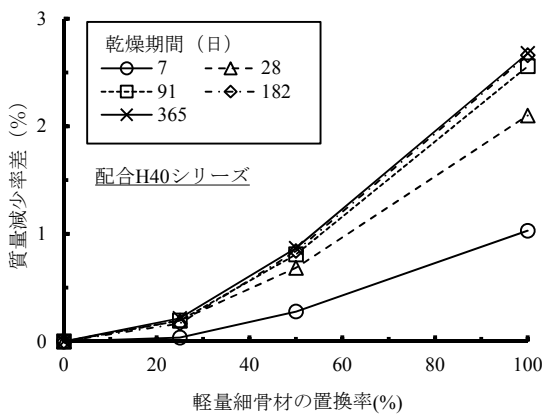
### (1) 自己収縮

自己収縮試験の結果を、図-5 に示す。軽量細骨材の置換率が大きいほど、コンクリートの自己収縮ひずみは小さくなる傾向が認められる。すなわち、低水セメント比の高強度コンクリートでは、水和初期の相対湿度の低下とそれに伴う毛管圧力の上昇に起因し、自己収縮ひずみを発生するが、骨材が飽和状態にある軽量骨材コンクリートでは、骨材内部からセメントマトリクスに水を





(a) 乾燥収縮ひずみ差



(b) 質量減少率差

図-6 乾燥収縮試験の結果

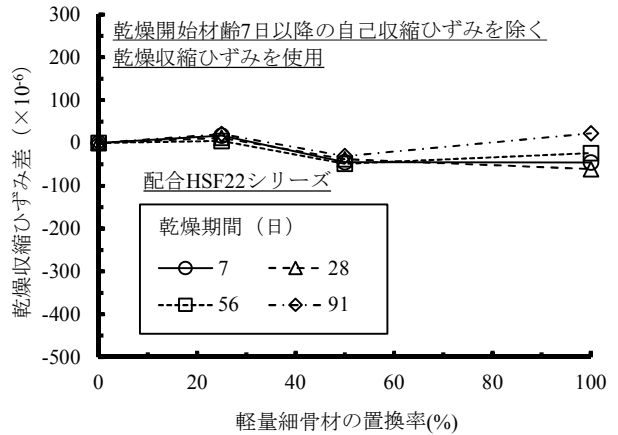
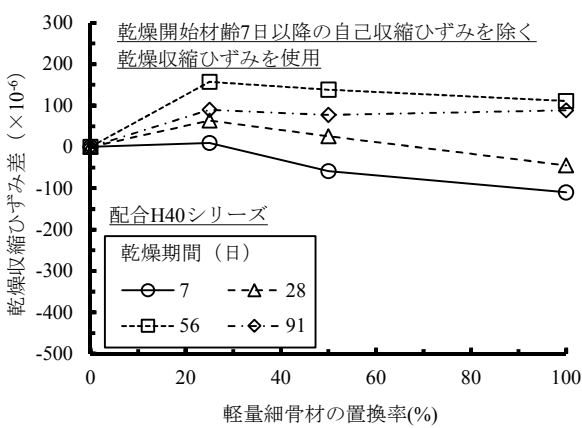


図-7 自己収縮ひずみを除く乾燥収縮ひずみによる評価

放出することで相対湿度の低下を抑制できることを、軽量細骨材の使用によっても確認された。

(2) 乾燥収縮

軽量細骨材の置換率と乾燥収縮ひずみ差および質量減少率差の関係を、図-6に示す。ここで、乾燥収縮ひずみ差および質量減少率差比とは、軽量細骨材の置換率

が0%の乾燥収縮ひずみおよび質量減少率を基準とし、各置換率の値から差し引いた値である。

配合H40シリーズに着目すると、乾燥期間7日では軽量細骨材の置換率が大いほど、乾燥収縮ひずみ差は小さくなっており、軽量細骨材の使用は初期の乾燥収縮を低減できることが分かる。しかし、乾燥期間が91日に達すると、置換率が25~100%の乾燥収縮ひずみ差は

0 もしくは若干大きく、乾燥期間が 182 日以降では  $100 \times 10^{-6}$  程度大きな値になっている。それらの長期の乾燥収縮ひずみ差には、軽量細骨材の置換率による差異は認められない。すなわち、配合 H40 シリーズでは、軽量細骨材の使用により、初期の乾燥収縮ひずみは若干小さくなるが、長期の乾燥収縮ひずみは若干大きくなる。

配合 HSF22 シリーズにおいては、乾燥期間 7 日では軽量細骨材の置換率が 100% の乾燥収縮ひずみ差は  $100 \times 10^{-6}$  程度小さくなるが、置換率が 25% および 50% の値は置換率が 0% の値と差異は認められない。乾燥期間 7 日以降 365 日までの乾燥収縮ひずみ差の変化は、軽量細骨材の置換率が 25% では微増し、50% では  $100 \times 10^{-6}$  程度増加する一方で、さらに 100% では  $250 \times 10^{-6}$  程度減少するというように、置換率によって異なる結果になった。

質量減少率差に着目すると、いずれの配合シリーズにおいても、軽量細骨材の置換率の増加に伴い、質量減少率差は大きくなる傾向がある。配合 H40 シリーズの質量減少率差は、乾燥期間 28 日までの質量減少率差が大部分を占めるが、乾燥期間が 91 日以降の質量減少率差は小さく、乾燥に伴う水分の蒸発は極めて少ないと言える。配合 HSF22 シリーズの質量減少率差は、配合 H40 シリーズに比べて極めて小さく、セメント組織が緻密であることを間接的に把握できる。細骨材の置換率を 50% まで増やしても、質量減少率差は乾燥期間 365 日で 0.25% 程度である。細骨材の置換率が 100% の場合には、質量減少率差の収束に要する乾燥期間は若干長くなる。

JIS の乾燥収縮試験は、乾燥開始材齢 7 日の長さ変化を測定したものであるが、乾燥期間中にも自己収縮を生じる。すなわち、試験結果は、自己収縮と乾燥収縮の双方を足し合わせたものであり、軽量細骨材の置換率が自己収縮、乾燥収縮に及ぼす影響が異なることで、前述のような傾向が不明瞭になる可能性があると考えられた。そこで、乾燥環境下の自己収縮が封緘状態の自己収縮と一致すると仮定し、乾燥開始材齢 7 日以降の自己収縮ひずみを差し引いた乾燥収縮ひずみを求め、軽量細骨材の置換率と乾燥収縮ひずみ差の関係を調べた。図-7 に示すとおり、配合 H40 シリーズの結果は、図-6 の結果と顕著な違いは認められないが、配合 HSF22 シリーズでは、軽量細骨材の置換率、乾燥期間に関わらず、乾燥収縮ひずみ差がほぼ 0 で一定であることが分かる。すなわち、軽量細骨材の使用が、配合 HSF22 シリーズのような高い強度域のコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は極めて小さい。

## 5. まとめ

細骨材の一部もしくは全部を軽量細骨材で置換した高強度コンクリートの力学的性質や体積変化を調べた結果、以下のことが明らかになった。

- ① 標準水中養生を行ったコンクリートの圧縮強度、ヤング係数およびひび割れ発生強度は、軽量細骨材の置換率が大きくなるほど、低下する傾向があるが、その影響の度合いは若干異なり、また配合の違いによる影響も存在する。
- ② 材齢 7 日まで封かん状態で、その後乾燥させたコンクリートの圧縮強度、ヤング係数およびひび割れ発生強度は、標準水中養生を行った場合と同等もしくは低下する。また、材齢 7 日の圧縮強度は、軽量細骨材の置換率が大きくなるほど、標準水中養生の圧縮強度と同等になり、封かん条件下での軽量細骨材による内部養生効果が確認された。なお、ひびわれ発生強度は、標準水中養生であってもばらつきが大きい。乾燥の影響が加わると一層ばらつきが大きくなり、軽量細骨材の置換率の影響が不明瞭になる。
- ③ 軽量細骨材の置換率が大きいほど、コンクリートの自己収縮ひずみは小さくなる傾向があり、軽量細骨材による内部養生効果が期待できる。
- ④ コンクリートの乾燥収縮ひずみは、配合 H40 シリーズ（水結合材比 40%）では、軽量細骨材を使用すると、これを使用しない場合に比べて、初期の乾燥収縮ひずみを若干小さくなるが、長期の乾燥収縮ひずみはそれとは反対に若干大きくなる。

一方、配合 HSF22 シリーズ（水結合材比 22%）においては、自己収縮ひずみを差し引いた乾燥収縮ひずみで評価すると、軽量細骨材の置換率、乾燥期間に関わらず、乾燥収縮ひずみ差がほぼ 0（一定）であり、軽量細骨材が高い強度域のコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は極めて小さい。

## 参考文献

- 1) 谷口秀明, 佐々木亘, 斯波明宏, 樋口正典: コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす要因に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.365-370, 2010.7
- 2) 谷口秀明, 佐々木亘, 斯波明宏, 村田宣幸: 東北地方の骨材を用いたコンクリートの品質評価, 第 20 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.461-464, 2011.10
- 3) 谷口秀明, 佐々木亘, 樋口正典: PC 部材に使用する

る早強コンクリートの自己収縮に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.533-538, 2011.7

- 4) 河野克哉, 二羽淳一郎, 岡本享久: 高品質軽量骨材を用いた低水セメント比コンクリートの体積変化機構, 土木学会論文集, No.802/V-69, pp.123-136, 2005.11
- 5) 谷口秀明, 浅井洋, 樋口正典, 三上浩: 膨張材と収縮低減剤を用いたコンクリートの収縮低減効果, 第16回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.167-170, 2007.10
- 6) 佐々木亘, 芦塚憲一郎, 出口宗浩, 谷口秀明: 高強度コンクリートの力学特性に与える鋼繊維の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.277-283, 2013.7
- 7) 谷口秀明: テストハンマーによる構造体コンクリートの強度推定法に関する研究, 筑波大学学位論文, 参考資料, p.付3, 2007.3