

軽量細骨材を用いた高強度コンクリートの諸特性

三井住友建設(株) 技術開発センター 正会員 博士(工学) ○谷口 秀明
 三井住友建設(株) 技術開発センター 正会員 修士(工学) 佐々木 亘
 三井住友建設(株) 技術開発センター 正会員 博士(工学) 樋口 正典

Abstract : This report describes the test results of compressive strength, Young's modulus, cracking strength, autogenous shrinkage and drying shrinkage of high-strength concrete containing artificial lightweight fine aggregate(ALFA). The cracking strength was measured by splitting tensile strength test. 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) The strength and Young's modulus of concrete decrease as increasing sl/s. 2) With curing effect of water included in ALFA, the strength of concrete with sealing curing is equal to that of concrete with standard curing under same mix proportion. 3) The autogenous shrinkage and initial drying shrinkage of ALFA concrete becomes small compared with that of concrete using normal fine aggregate, but long-term drying shrinkage becomes equally or large.

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、PC橋への適用により新構造形式の採用や供用期間の延長等を可能にし得る。しかし、水結合材比が小さいため、自己収縮が大きくなる傾向がある。また、コンクリートの自己・乾燥収縮は、使用する普通骨材によっては相当に大きくなる場合¹⁾があり、高強度コンクリートもその例外ではない。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^{2), 3)}が、高強度コンクリートとして必要な強度やヤング係数の低下、あるいは長期の乾燥収縮の増加を招くため、その使用に当たっては注意が必要である。

そこで、本研究では、力学的性質を大幅に低下させない範囲で軽量骨材を使用し、コンクリートの自己収縮の低減を図る目的で、細骨材の一部もしくは全部を軽量細骨材で置換した、PC部材用高強度コンクリートの力学的性質および体積変化を確認した。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの条件

コンクリートの使用材料を表-1、配合条件を表-2に示す。評価の対象は、PC 橋上部構造の現場打ちで使用される、設計基準強度が 40N/mm² 程度のコンクリート (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、設

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3.13g/cm ³)	C
混和材	シリカフェューム (エジプト産, 密度2.25g/cm ³ , BET比表面積15.8m ² /g)	SF
細骨材	山砂(表乾密度2.62g/cm ³ , 吸水率1.87%)と砕砂(硬質砂岩, 表乾密度2.61g/cm ³ , 吸水率1.68%)を容積比4:6で混合	S1
	砕砂(石灰石, 表乾密度2.58g/cm ³ , 吸水率2.68%)	S2
	人工軽量細骨材 (膨張性頁岩, 表乾密度1.87g/cm ³ , 吸水率14.5%, 含水率26.0%)	SL
粗骨材	砕石2005(硬質砂岩, 表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率0.96%)	G1
	砕石1305(硬質砂岩, 表乾密度2.65g/cm ³ , 吸水率0.60%)	G2
化学混和剤	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物)	SP1
	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7.85g/cm ³ , 繊維径0.2mm, 繊維長22mm引張強度2000N/mm ² 以上)	Fr

計基準強度が 80~100N/mm² 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) である。表-1 中の記号の添字 1, 2 を付けた材料は、それぞれの配合シリーズに使用したものである。いずれも早強ポルトランドセメントを使用し、配合 HSF22 シリーズではセメントの10%をシリカフェームで置換した。短繊維は、その混入率 Vf が 0.5%でも十分に補強効果を発揮する、微細で、高い引張強度を有する鋼繊維である⁴⁾。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、その置換率 sl/s (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。

表-2 コンクリートの配合条件

対象	記号	水結 合材 比 W/B (%)	軽量細 骨材置 換率 sl/s (%)	鋼織 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 ³)
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					

2.2 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の測定は、それぞれ、JIS A 1108, JIS A 1149 に準拠した。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、封緘・乾燥の影響を把握するため、恒温恒湿室 (温度 20±2°C, 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。養生方法や試験材齢は、圧縮強度と同じである。短繊維補強コンクリートの供試体は、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、荷重の持続にともない、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いていく。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、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は、最大荷重の読み値から求まる引張強度では評価できない。そこで、本論文では、いずれの配合シリーズの場合にも、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、(公社)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。

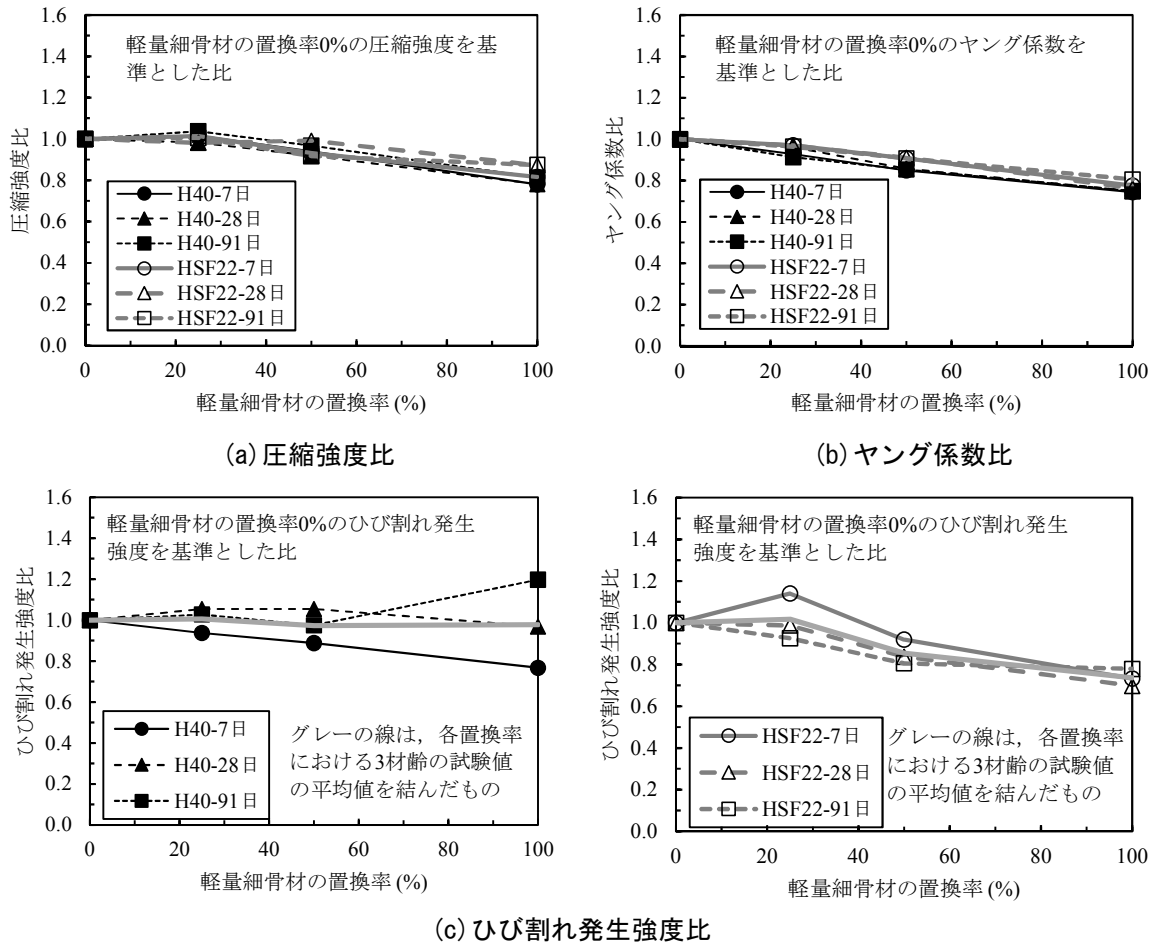
3. 実験結果および考察

3.1 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-1 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、その置換率が0%の試験値で除した値である。圧縮強度比は、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ともな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。ただし、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与える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-2 は、今回の試験結果と、参考として、筆者の一人⁵⁾ 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



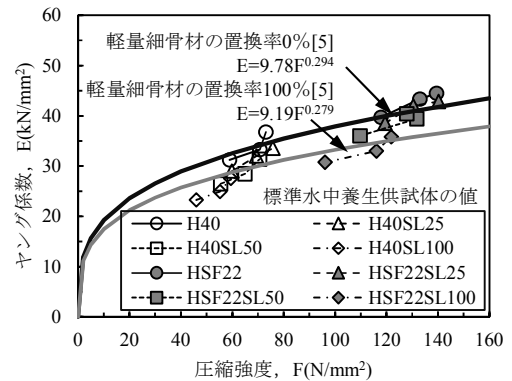
図一 各強度比と軽量細骨材の置換率の関係 (標準水中養生の場合)

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ともない、置換率が0%から100%の回帰式の曲線に近づくことがわかる。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与える影響は、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、図一に示すように、圧縮強度比、ヤング係数比と比べ、材齢によって異なる傾向を示し、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ともない、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わかる。

(2) 気中養生

気中養生を行った場合の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



図二 圧縮強度とヤング係数の関係

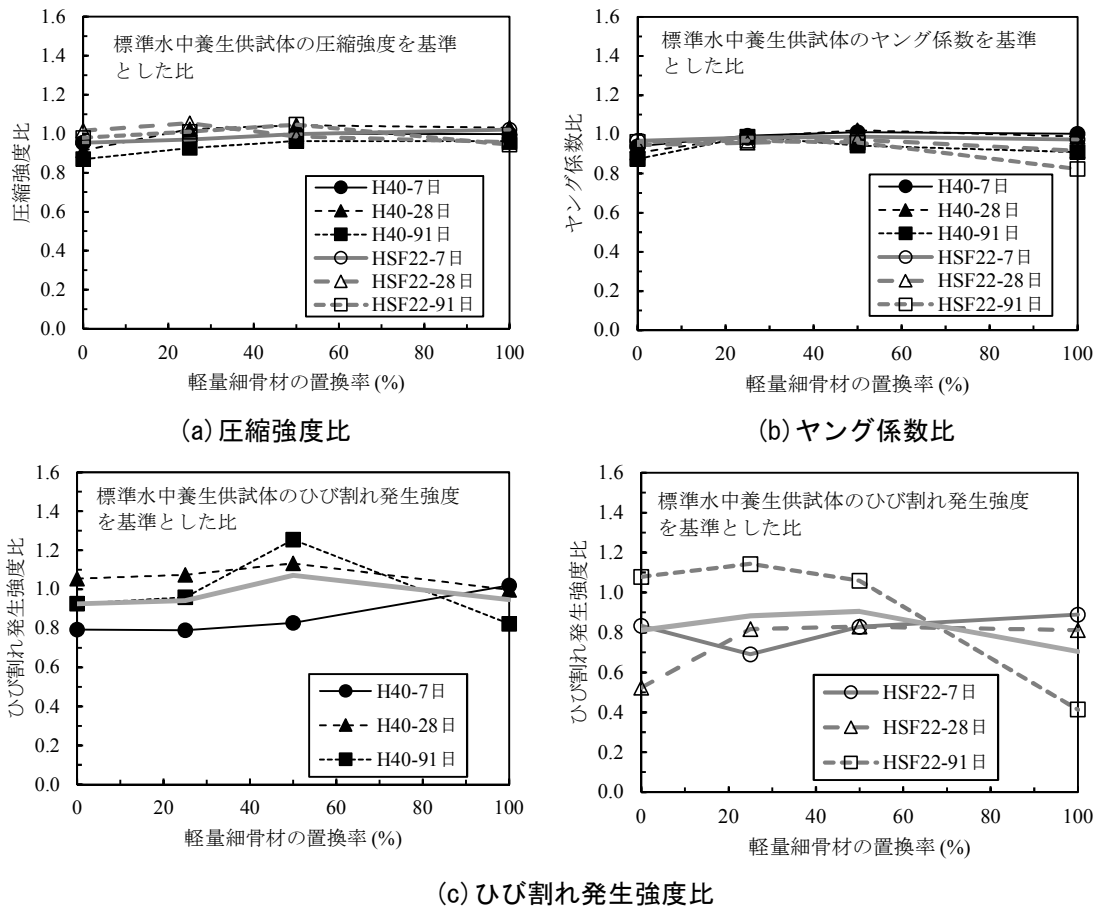


図-3 各強度比への乾燥の影響

比の関係を、図-3に示す。ここで、それらの比は、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日の値に比べて置換率50%までは高いが、100%まで高めると低くなる。

3.2 収縮特性

(1) 自己収縮

自己収縮試験の結果を、図-4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ともな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放出する

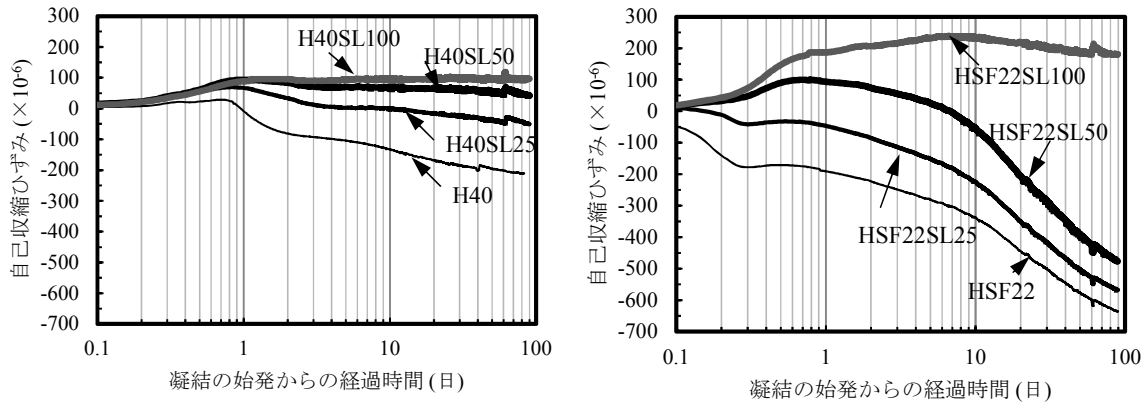


図-4 自己収縮試験の結果

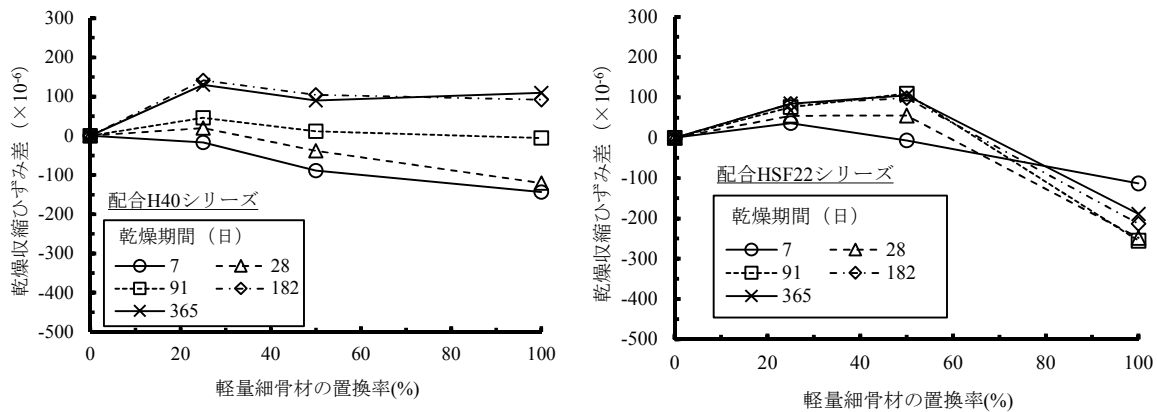


図-5 乾燥収縮試験の結果

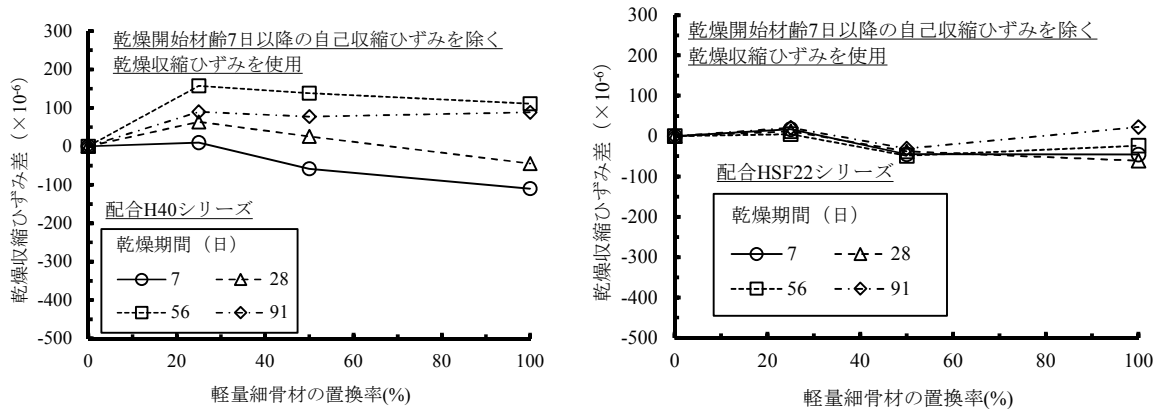


図-6 自己収縮ひずみを除く乾燥収縮ひずみによる評価

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の関係を、図-5に示す。ここで、乾燥収縮ひずみ差とは、軽量細骨材の置換率が0%の乾燥収縮ひずみを基準とし、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きいほど、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わかる。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 100×10^{-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 100×10^{-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%の値との差異が認められない。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 100×10^{-6} 程度増加する一方で、さらに100%では 250×10^{-6} 程度減少するというように、その置換率によって異なる結果になった。

JISの乾燥収縮試験は、乾燥を開始する材齢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、乾燥収縮に与える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、乾燥を開始する材齢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-6に示すとおり、配合H40シリーズの結果は、図-5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わかる。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与える影響は極めて小さい。

4. 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および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の増加にともない、低下する傾向がある。
- (2) 材齢7日まで封緘状態で、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、封緘条件下での軽量細骨材中の水による内部養生効果が確認された。
- (3) 軽量細骨材の置換率の増加にともない、自己収縮ひずみは小さくなる傾向がある。すなわち、自己収縮の低減に対して軽量細骨材中の水による内部養生効果が期待できる。
- (4) 乾燥収縮ひずみは、水結合材比40%では、軽量細骨材の使用により、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若干大きくなる。一方、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には、軽量細骨材の置換率の影響がほとんど認められず、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与える影響は極めて小さい。

参考文献

- 1) 例えば、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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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