

早強セメントを用いた環境負荷低減型コンクリートの基礎物性

Fundamental Properties of Environmental Impact-Reduction Concrete using High Early Strength Cement

ス波 明宏 AKIHIRO SHIBA
 谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI
 樋口 正典 MASANORI HIGUCHI
 佐々木 亘 WATARU SASAKI

コンクリートのCO₂排出量削減を目的として、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混和した環境負荷低減型コンクリートについて数多く検討されているが、PC構造物などで使用される早強セメントを用いた配合での検討事例は非常に少ない。本報告では、PC構造物への環境負荷低減型コンクリートの適用を最終目的として、混和材種類および養生方法の違いが強度、収縮などの基礎物性に与える影響の確認を行った。その結果、蒸気養生の場合は混和材による強度の違いがあまり見られないことや、フライアッシュの自己収縮抑制効果が大きいことなどが明らかとなった。

キーワード：高炉スラグ微粉末，フライアッシュ，早強セメント，強度，収縮

CO₂ reducing in concrete using ground granulated blast-furnace slag or fly ash have been studied much, but studies on the concrete using high early strength cement are few. This paper describes the influences of admixtures and curing methods on strength and shrinkage to apply the concrete to pre-stressed concrete structures. The followings are clarified; 1) The differences of strengths depend on admixtures using steam curing are not much observed, 2) The fly ash achieves large reduction effect of autogenous shrinkage.

Key Words: Ground Granulated Blast-Furnace Slag, Fly Ash, High Early Strength Cement, Strength, Shrinkage

1. はじめに

近年、CO₂排出量削減など環境負荷低減に関する取り組みが盛んに行われており、コンクリート業界でもそうした動きが活発になってきている。以前から高炉スラグ微粉末やフライアッシュといった産業副産物（廃棄物）をコンクリートに利用する試みは行われており^{1), 2)}、高炉セメントなどすでに定着化しているものもある。しかしながら、一般的なRC構造物ではそのようなコンクリートを使用している場合が見られるが、橋梁等に代表されるPC構造物ではほとんど適用されるには至っていない。特に早強セメントをベースとした配合に高炉スラグ微粉末やフライアッシュといった混和材を使用した検討事例が極めて少ないのが現状である。

本報告では、早強セメントと高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを混合した配合について、基礎物性となる圧縮強度、割裂引張強度、自己収縮および乾燥収縮に

関する試験を行い、混和材の影響を検討した。また、現場打設を想定した養生方法と工場製品を想定した蒸気養生を含めた4通りの養生について検討を行った。

2. 試験概要

(1) 試験配合

表-1に試験に用いたコンクリートの配合を示す。セメントは早強ポルトランドセメント、粗骨材G1は碎石、細骨材は砕砂S1および山砂S2を併用した。高炉スラグ微粉末はJIS規格の4000(BFS4)と6000(BFS6)の2種類を、フライアッシュはJIS規格のI種(FA1)とII種(FA2)を使用した。なお、高炉スラグ微粉末4000にはせつこうがSO₃換算で1.96%添加されている。各配合で水結合材比W/Bは40.0%で一定とし、高炉スラグ微粉末については混合率50%、フライアッシュについては混合率30%とした。各配合のスランブは12±2.5cm、空気量

表-1 コンクリートの配合

配合	W/B (%)	s/a (%)	混和材 置換率 (%)	基本材料の単位量 質量 (kg/m ³)									混和剤 高性能 AE減水 剤 (B×%)
				W (水)	B (結合材)				S		G		
					C (セメント)	その他結合材			S1 (砕砂)	S2 (山砂)	G1 (碎石)		
						H	BFS4	BFS6				FA I	
H40	40.0	43.0	0.0	165	413	—	—	—	—	443	298	994	0.70
BFS4	40.0	42.6	50.0	165	207	206	—	—	—	435	292	994	0.55
BFS6	40.0	42.6	50.0	165	207	—	206	—	—	435	292	994	0.60
FA1	40.0	42.0	30.0	165	289	—	—	124	—	426	286	994	0.50
FA2	40.0	41.5	30.0	165	289	—	—	—	124	417	280	994	0.50

は4.5±1.5%とした。

(2) 養生方法

養生方法については、表-2 に示すように標準養生と現場打設を想定した材齢3日までの水中養生、工場製品を想定した蒸気養生と蒸気養生後、材齢7日まで水中養生した場合の4つの養生方法で試験を行った。いずれも打ち込み直後に封緘状態とし、翌日脱枠を行った。蒸気養生については図-1 に示すような温度設定とし、文献3)を参考に注水から8時間後に温度を上昇させ、温度50℃で5時間養生した後、温度を下げ、注水から24時間後に脱枠した。各養生とも所定の養生が終了した段階で温度20℃、湿度60%の気中養生とした。

(3) 強度試験

圧縮強度および割裂引張強度はそれぞれ JIS A 1108, JIS A 1113 に準拠して行った。試験材齢は養生 A および養生 B が 3 日, 7 日, 28 日, 養生 C および養生 D は 1 日, 7 日, 28 日とした。

(4) 収縮試験

自己収縮試験は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」に準拠して行った。試験体は翌日脱枠し、封緘状態にして温度20℃で保管し、埋込み型ひずみ計により打ち込み直後から計測した。なお、自己収縮試験については養生方法が表-2 の養生条件と大きく異なるため、標準養生(温度20℃で翌日まで保管)と蒸気養生の2種類とし、養生温度が自己収縮に及ぼす影響を確認した。

乾燥収縮試験(長さ変化試験)は JIS A 1129 に準じて行った。ただし、測定開始材齢は養生 A を除いて各養生方法が終了した時点とした(養生 A : 材齢7日, 養生 B : 材齢3日, 養生 C : 材齢1日, 養生 D : 材齢7日)。試験条件は温度20℃, 湿度60%とし、それぞれ乾燥期間7日, 28日, 56日で測定を行った。

表-2 養生方法

養生種別	養生方法
養生A	標準養生(翌日脱枠後20℃水中養生)
養生B	翌日脱枠後材齢3日まで20℃水中養生
養生C	蒸気養生(蒸気養生終了まで封緘状態)
養生D	蒸気養生+材齢7日まで20℃水中養生

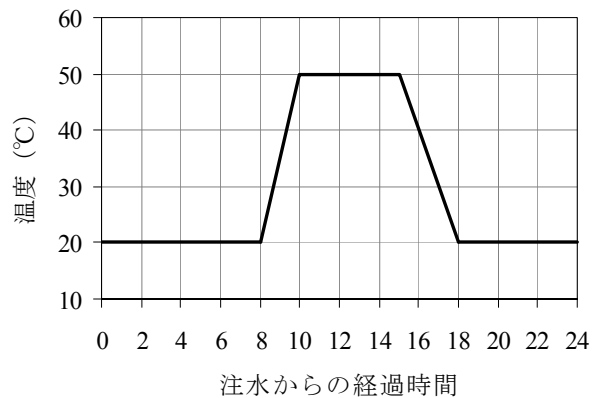


図-1 蒸気養生の温度設定

3. 圧縮強度試験結果

(1) 混和材の影響

各配合における養生 A (標準養生) と養生 C (蒸気養生) の圧縮強度を図-2 に示す。凡例は配合名-養生方法となっている。実線が養生 A, 破線が養生 C である。

混和材を使用した配合は無混合のものとは比べて全体的に強度が小さく、材齢が若いほどその差は大きい。混和材の種別で比較すると、標準養生(養生 A)の場合、おおむね高炉スラグ微粉末 6000 > 高炉スラグ微粉末 4000 > フライアッシュ I 種 > フライアッシュ II 種の順に圧縮強度が小さくなっているが、材齢3日ではほとんど差がない結果となっている。圧縮強度の増進については、養生 A の場合、混和材を使用した配合は無混合のものに比べて圧縮強度の増進が見られ、特に高炉スラグ微粉末については材齢 28 日で無混合のものとはほぼ同等に

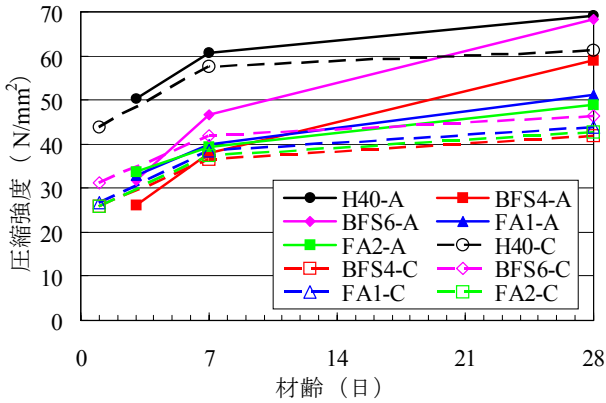


図-2 各配合における圧縮強度

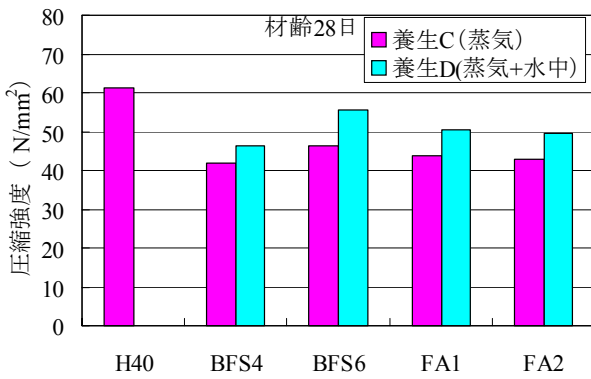


図-4 養生 C, 養生 D における圧縮強度

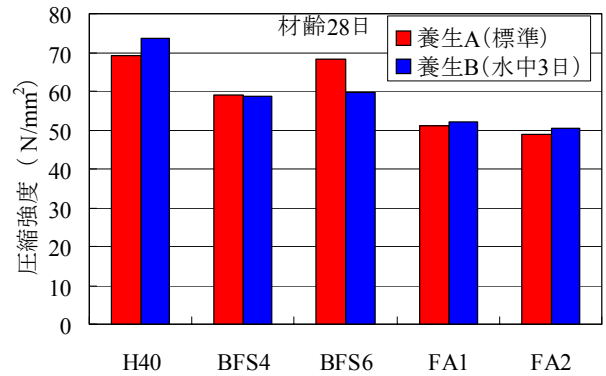


図-3 養生 A, 養生 B における圧縮強度

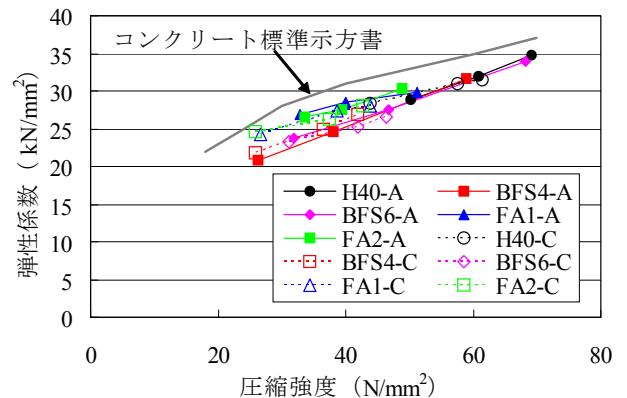


図-5 圧縮強度と静弾性係数の相関

増進している。

一方、蒸気養生（養生 C）の場合には、混和材の種別によらず、ほぼ同様の強度発現特性を示しており、圧縮強度に大きな差異が見られないのが特徴的である。蒸気養生の場合、材齢 1 日以降気中養生となり、混和材の反応促進に必要な水分が十分与えられないため、圧縮強度に違いが生じ難くなったものと考えられる。これは圧縮強度の増進が標準養生に比べると小さくなっていることから言える。

高炉スラグ微粉末については 6000 のほうが 4000 に比べて圧縮強度が大きくなっているが、フライアッシュについては I 種と II 種であまり差異は見られなかった。

(2) 養生方法の影響

材齢 28 日における各養生方法による圧縮強度を図-3 および図-4 に示す。

養生 A と養生 B を比較した結果、高炉スラグ微粉末を使用した配合を除いてはいずれも養生 B において圧縮強度が若干高くなっている。これは試験時の試験体の乾燥度合いの違いによるものと考えられる。全体的にはほぼ同等と見られることから、材齢 28 日の圧縮強度においては、水中養生期間が 3 日以上あれば養生の影響は小さい

と考えられる。

養生 C と養生 D を比較した結果、蒸気養生後に水中養生を加えた養生を行うことにより、いずれも圧縮強度が増加している。前述したように、蒸気養生の場合は混和材の反応促進に必要な水分が絶対的に不足していることが本結果からも明らかである。

(3) 静弾性係数

養生 A と養生 C における圧縮強度と静弾性係数の相関を図-5 に示す。各配合について材齢 1 日または 3 日、7 日、28 日の測定結果を示している。図中の灰色線はコンクリート標準示方書 [設計編]⁴⁾ に示される値である。

静弾性係数については、フライアッシュを使用した配合において若干高くなっているものの、全体的にはほぼ同じ相関を示しており、比例関係に近い相関となった。示方書の値に比べると静弾性係数は小さめであるが、各混和材を使用した配合が無混合のものと同様性状であることから、混和材や養生方法が静弾性係数に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

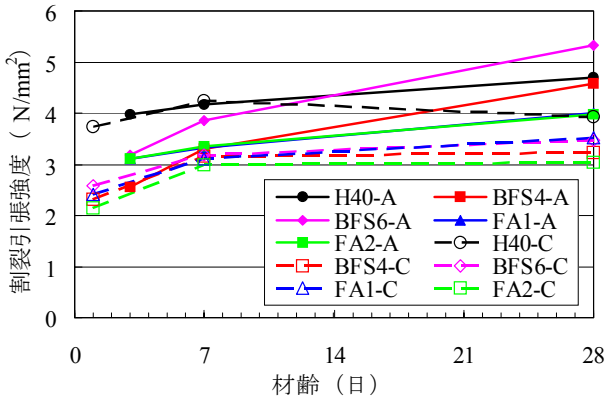


図-6 各配合における割裂引張強度

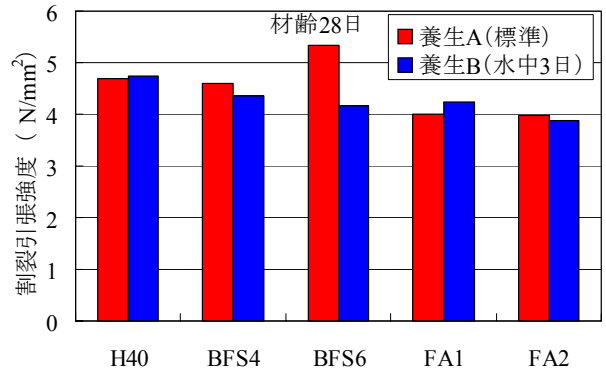


図-7 養生 A, 養生 B における割裂引張強度

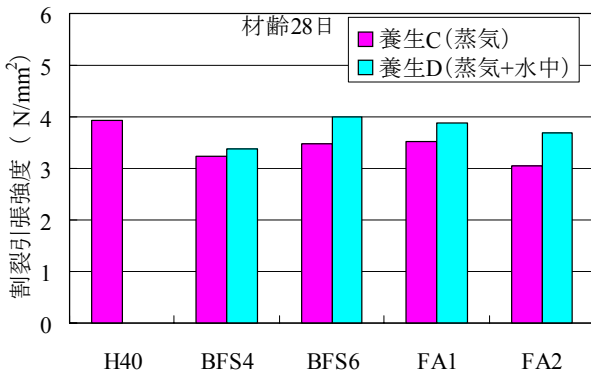


図-8 養生 C, 養生 D における割裂引張強度

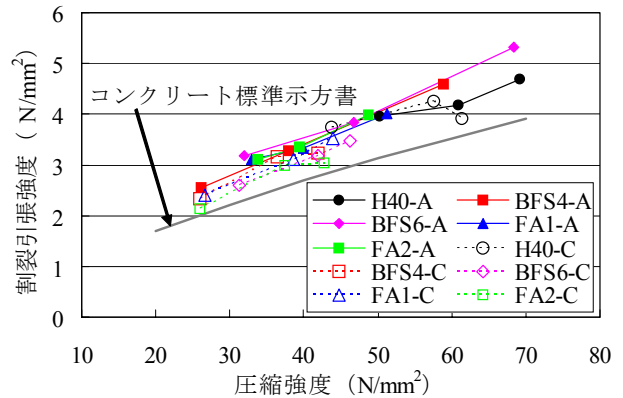


図-9 圧縮強度と割裂引張強度の相関

4. 割裂引張強度試験結果

(1) 混和材の影響

各配合における養生 A と養生 C の割裂引張強度を図-6 に示す。凡例等は図-2 と同じである。

混和材を使用した配合は無混合のものに比べて全体的に割裂引張強度が小さく、材齢が若いほどその差は大きい。混和材の種別で比較すると、養生 A の場合、圧縮強度の場合と同じ傾向となっている。割裂引張強度の増進については、養生 A の場合、混和材を使用した配合は無混合のものに比べて増進が大きく、特に高炉スラグ微粉末については材齢 28 日で無混合のものと同程度以上に増進している。

一方、養生 C の場合には、混和材の種別によらず、ほぼ同様の強度発現特性を示しており、養生 A の場合ほど割裂引張強度に大きな差異が見られない。

高炉スラグ微粉末については 6000 のほうが 4000 に比べて割裂引張強度が大きくなっている。フライアッシュについては養生 C では I 種のほうが II 種に比べて若干大きくなったが、その他の養生方法ではあまり差異は見られなかった。

全体的な傾向としては圧縮強度の場合と同様である。

(2) 養生方法の影響

材齢 28 日における各養生方法による割裂引張強度を図-7 および図-8 に示す。

養生 A と養生 B を比較した結果、全体的にはほぼ同じか養生 A のほうが若干大きい結果となった。材齢 28 日の割裂引張強度においては、水中養生期間が 3 日以上あれば養生の影響は小さいと考えられる。

養生 C と養生 D を比較した結果、蒸気養生後に水中養生を加えることにより、いずれも割裂引張強度が増加しており、高炉スラグ微粉末 6000 とフライアッシュ I 種では無混合のものと同程度まで発現している。

全体的な傾向は圧縮強度の場合と同様である。

(3) 圧縮強度との相関

養生 A と養生 C における圧縮強度と割裂引張強度の相関を図-9 に示す。各配合について材齢 1 日または 3 日、7 日、28 日の測定結果を示している。図中の灰色線はコンクリート標準示方書 [設計編] による算定値である。割裂引張強度については、全体的にはほぼ同様の相関を示しており、比例関係に近い相関となった。示方書の相関に比べると割裂引張強度は若干大きい、各混和材を使用した配合が無混合のものと同様性状であることから、混和材や養生方法が圧縮強度と割裂引張強度の相関

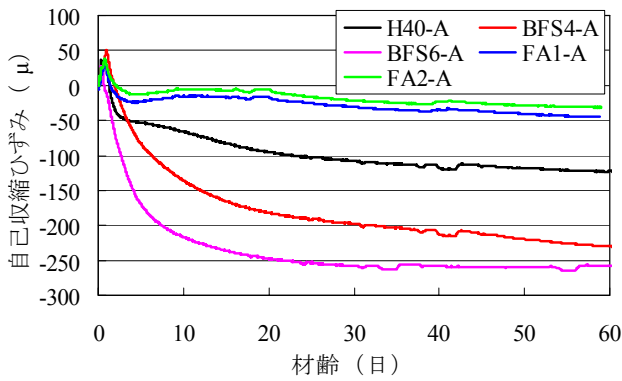


図-10 自己収縮ひずみ測定結果（養生 A）

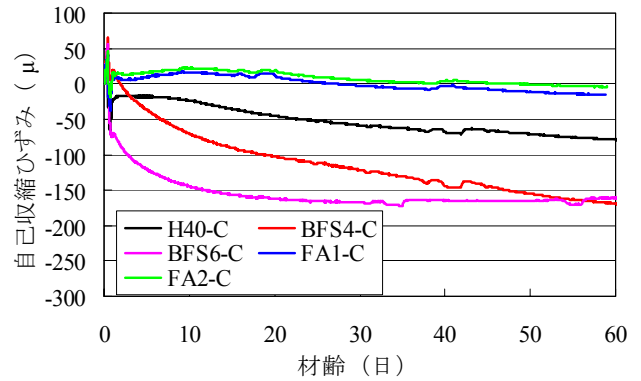


図-11 自己収縮ひずみ測定結果（養生 C）

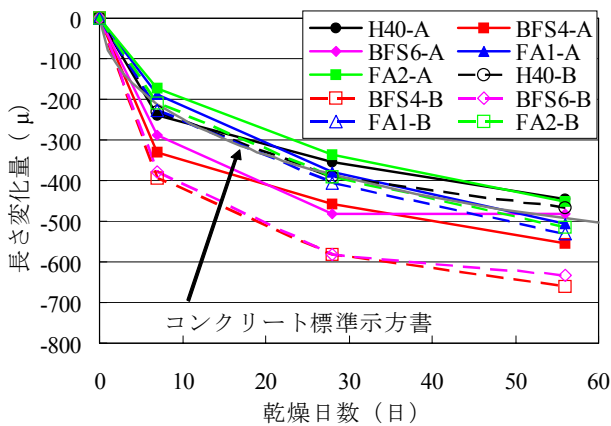


図-12 長さ変化測定結果（養生 A, 養生 B）

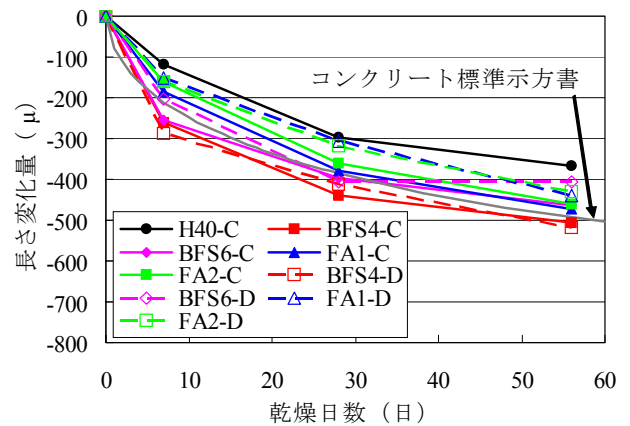


図-13 長さ変化測定結果（養生 C, 養生 D）

に及ぼす影響は小さいと考えられる。

5. 自己収縮に関する試験結果

養生 A（20℃封緘状態での測定）と養生 C（温度のみ蒸気養生と同じで封緘状態での測定）での自己収縮ひずみ測定結果をそれぞれ図-10 および図-11 に示す。なお、本結果はコンクリートの線膨張係数を 10.5×10^{-6} と仮定して、埋込み型ひずみ計の温度の影響を補正した結果である。

いずれも打ち込み初期に膨張ひずみが生じた後、急速に収縮ひずみが生じている。特に高炉スラグ微粉末は自己収縮ひずみが大きく、材齢 10 日頃までのひずみの増進も大きいのが特徴的である。材齢初期では高炉スラグ微粉末の粉末度が大きいほど自己収縮ひずみが大きくなるが、ひずみの収束も他と比べて早いため、材齢が進むにつれて、その差は小さくなっている。

フライアッシュについては、I 種と II 種でほとんど差異はなく、いずれも自己収縮ひずみはかなり小さくなった。PC 用配合では一般にセメント量が多く、自己収縮ひずみによるひび割れなどが懸念されるため、フライアッシュの自己収縮抑制効果に期待するところは大きいもの

と判断される。

養生方法の違いについては、蒸気養生と同じ温度履歴を与えた場合、20℃の場合よりも全体的に自己収縮ひずみが小さくなった。特にフライアッシュについてはほぼ 0 となっている。一般に高温履歴を受けると自己収縮は大きくなると言われているが、今回のような蒸気養生の範囲では、むしろ収縮ひずみが生じにくいセメントペーストマトリクスを形成するのではと推察される。

6. 乾燥収縮に関する試験結果

(1) 長さ変化測定結果

材齢 56 日までの長さ変化測定結果を図-12 および図-13 に示す。図中の灰色線はコンクリート標準示方書〔設計編〕による推定値である ($W=165\text{kg/m}^3$)。

養生 A と養生 B で比較した結果、フライアッシュを使用した配合および無混合の長さ変化量に大きな差はなく、養生方法による違いがあまり見られない結果となった。また、示方書の推定値とほぼ同じ傾向となった。それに対し、高炉スラグ微粉末を使用した配合は他に比べて特に初期材齢での長さ変化量が大きく、養生 B では養生 A に比べて 100μ 程度大きくなった。養生 C と養生 D で比

較した結果、蒸気養生の場合も高炉スラグ微粉末を用いた配合において長さ変化量は大きくなっているが、自己収縮の場合と同様、全体的に小さくなっている。フライアッシュを使用した配合については、蒸気養生後に水中養生を行うと若干長さ変化量が小さくなるが、高炉スラグ微粉末 4000 についてはあまり差異がない結果となっている。

(2) 乾燥収縮ひずみ

上記長さ変化量は測定開始からの自己収縮量を含んでいることから、純粋な意味での乾燥収縮ひずみではない。そこで、簡易的に自己収縮ひずみ量の測定結果を用いて、長さ変化量から各測定時における自己収縮ひずみ量の増分(乾燥開始時を基準とする)を差し引いた結果を図-14 および図-15 に示す。

全体的な傾向は、長さ変化の場合と同様であるが、無混合のものが最も乾燥収縮ひずみが小さい結果となっている。それに対し、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を使用した配合は、多少のバラツキはあるものの、無混合のものに対し、試験期間 56 日で 0~100 μ 程度の範囲となっている。蒸気養生の場合は、全体的に 100 μ 程度小さくなっており、自己収縮の場合と同様の傾向が見られる。養生 A と養生 B を比べると高炉スラグ微粉末およびフライアッシュとも養生期間の影響を受けることは明らかである。

本試験の範囲では、混和材を使用すると簡易的に自己収縮の影響を取り除いた乾燥収縮ひずみが若干増加する傾向にあるが、混和材の使用によって極端に乾燥収縮ひずみが異なることはないと考えられる。収縮全体で見れば乾燥収縮ひずみに起因する部分が大きい、混和材の影響は主に自己収縮に起因するものと推察される。

7. まとめ

今回の試験で得られた知見を以下に示す。

- ① 混和材を使用した場合、養生方法に関わらず材齢 28 日までの圧縮強度は小さくなる。ただし、強度の増進は無混合のものよりも大きくなる。
- ② 蒸気養生の場合、圧縮強度および割裂引張強度に対する混和材の種別による相違は少ない。また、蒸気養生後に水中養生を行うことで強度が増進する。
- ③ 割裂引張強度と圧縮強度の相関は配合に拘らずほぼ同じであり、比例関係に近い相関である。
- ④ 高炉スラグ微粉末を用いると自己収縮ひずみがかなり大きくなり、逆にフライアッシュを用いる

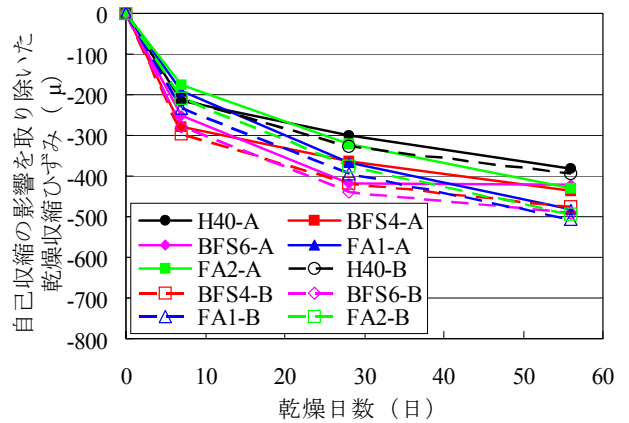


図-14 乾燥収縮ひずみ(養生 A, 養生 B)

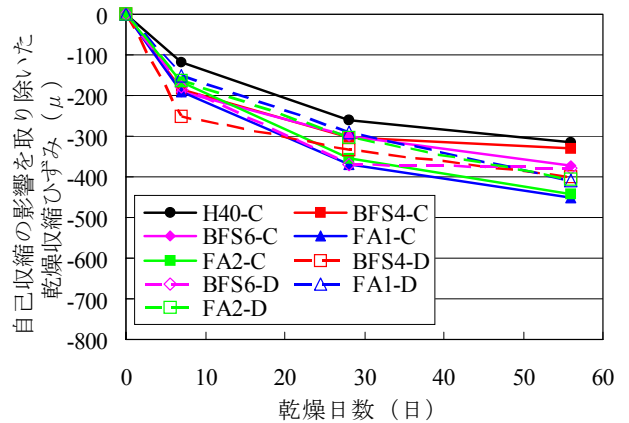


図-15 乾燥収縮ひずみ(養生 C, 養生 D)

とかなり小さくなる。蒸気養生の場合は、全体的に自己収縮ひずみが小さくなる。

- ⑤ 混和材を用いた場合、乾燥収縮ひずみは養生の影響を受け易い。
- ⑥ 簡易的に自己収縮の影響を取り除いた乾燥収縮ひずみは、混和材の使用によって若干増加するものの、無混合のものと大きく異なる。収縮に対する混和材の影響は主に自己収縮に起因するものである。

参考文献

- 1) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，1996.6
- 2) 日本建築学会：高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調合設計・施工指針(案)・同解説，1996.1
- 3) 谷口秀明，渡辺博志，田中良樹，藤田学：高炉スラグ微粉末を用いた PC 用コンクリートの特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1, pp.531~536, 2002
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕2007 年制定，2007