

早強セメントを用いた環境負荷低減型コンクリートの諸特性

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

斯波 明宏 AKIHIRO SHIBA

谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI

樋口 正典 MASANORI HIGUCHI

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収縮、塩分浸透性、発熱特性などの諸特性に与える影響を検討した。その結果、フライアッシュの自己収縮抑制効果が大きいことや、小型簡易断熱試験でも混和材によって発熱特性が大きく異なる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、収縮、塩分浸透、発熱特性

CO₂ reduction in concrete using ground granulated blast-furnace slag or fly ash have been studied much, but there are quite few studies on the concrete using high-early strength cement. This paper describes the influences of admixtures and curing methods on shrinkage, chloride permeation and hydration heat in order to apply the high-early strength cement to pre-stressed concrete structures. The followings are clarified; 1) The fly ash achieves large reduction effect of autogenous shrinkage, 2) The properties of hydration heat are different depending on admixtures even in small simplified adiabatic apparatus.

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

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、橋梁などに代表される PC 構造物ではほとんど適用されるには至っていない。とく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は極めて少ないのが現状である。昨年度、早強セメントに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、圧縮強度、割裂引張強度、自己収縮および乾燥収縮について検討した結果を報告した³⁾。本報告では、昨年度以降の長期的な収縮性状に関してとり

まとめるとともに、新たに塩分浸透特性、発熱特性に関する試験を行い、混和材の影響を検討した。塩分浸透特性については、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 通りの養生方法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（以下表中の配合名で示す）。セメントは早強ポルトランドセメント、粗骨材 G1 は砕石、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（比表面積 4490cm²/g）（BFS4）と 6000（比表面積 6480cm²/g）（BFS6）の 2 種類を、フライアッシュは JIS 規格の II 種（比表面積 3880cm²/g）（FA2）を使用した。なお、高炉スラグ微粉末 4000 にはせっこうが 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% で一定

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
FA2	40.0	41.5	30.0	165	289	—	—	—	124	417	280	994	0.50

とし、高炉スラグ微粉末については置換率 50%、フライアッシュについては置換率 30%とした。各配合のスランプは 12±2.5cm、空気量は 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、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、蒸気養生後に材齢 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 4) 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) 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いずれも封緘状態での測定となるため、標準養生（打設後から温度 20℃で保管）と蒸気養生（蒸気養生終了後 20℃で保管）の 2 種類とした。

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 365 日まで測定を行った。

(4) 塩分浸透試験

塩分浸透性状を確認するため、JSCE-G572「浸漬によるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」に準拠して行った。濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液に 180 日間浸漬したのち、測定面から 10mm

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

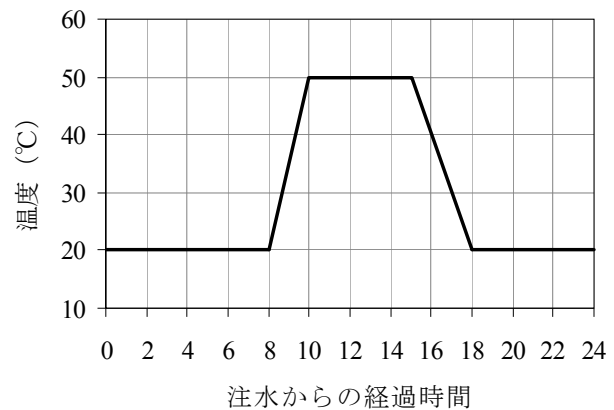


図-1 蒸気養生の温度設定

ごとに試験体を切断し、深さごとの全塩化物イオン量を JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠して測定した。

(5) 簡易断熱試験

発熱特性を把握するため、簡易断熱試験を行った。試験体はφ150×300mmとし、厚さ 200mmの発砲スチロールで全体を覆った。試験体の中心温度と外気温を測定し、解析には有限要素法による温度応力解析プログラム（ASTEAMACS）を使用した。

3. 収縮試験結果

(1) 自己収縮に関する試験結果

標準養生（温度 20℃で保管）と蒸気養生（蒸気養生終了後 20℃で保管）での自己収縮ひずみ測定結果をそれぞれ図-2 および図-3 に示す。図中の黒破線は日本コンク

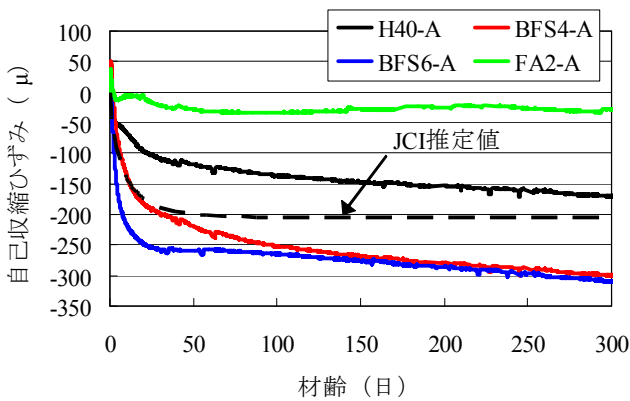


図-2 自己収縮測定結果 (標準養生)

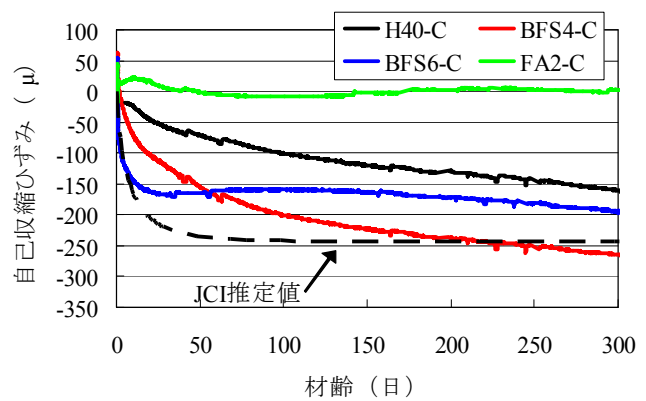


図-3 自己収縮測定結果 (蒸気養生)

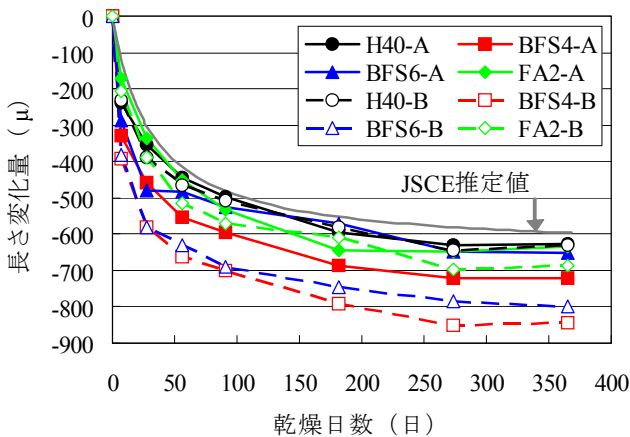


図-4 長さ変化測定結果 (養生 A, 養生 B)

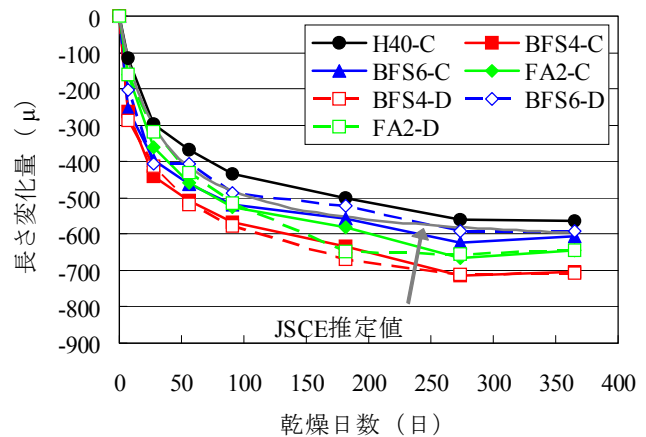


図-5 長さ変化測定結果 (養生 C, 養生 D)

リート工学会 (JCI) 「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」による推定値 (早強, W/C=40%) である。

いずれの養生方法においても高炉スラグ微粉末を使用した配合で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。

材齢初期のひずみの増大については、せつこうの有無も影響を及ぼしていると考えられ、一般的にせつこうを添加することで初期の収縮ひずみを抑制すると言われている。しかしながら、本結果より、最終的なひずみ量については、せつこうを添加したほうが効果的であるとは必ずしも言えない結果となっている。

フライアッシュを使用した配合では、いずれの養生方法においても自己収縮ひずみはかなり小さくなった。フライアッシュをセメントと置換することで、見掛け上、水セメント比が大きくなり、自己収縮が小さくなることも要因の一つと考えられるが、フライアッシュ自体が自己収縮増大には寄与しないことが明らかとなった。

蒸気養生と同じ温度履歴を与えた場合、20℃封緘状態

の場合と全体的な傾向は同じであるが、自己収縮ひずみは小さくなる傾向にあった。とくに高炉スラグ微粉末 6000 を使用した配合の自己収縮ひずみはかなり小さくなっている。一般的に高温履歴を与えると自己収縮ひずみ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、蒸気養生以降の収縮が抑制される結果となっている。

JCI の推定値では、比較的早期にひずみが収束しているのに対し、本結果では、フライアッシュを使用した配合を除き、ゆっくりとひずみが増大している点が異なっている。

(2) 長さ変化に関する試験結果

乾燥期間 365 日までの長さ変化測定結果を図-4 および図-5 に示す。図中の灰色線はコンクリート標準示方書 [設計編] 2012 年制定による早強のみの配合の推定値である。

いずれも乾燥期間 365 日では、ほぼ長さ変化が収束した状態となっている。養生 A (標準養生) の場合、高炉スラグ微粉末 4000 を使用した配合を除いては、最終的にほぼ同じような長さ変化量となった。高炉スラグ微粉末

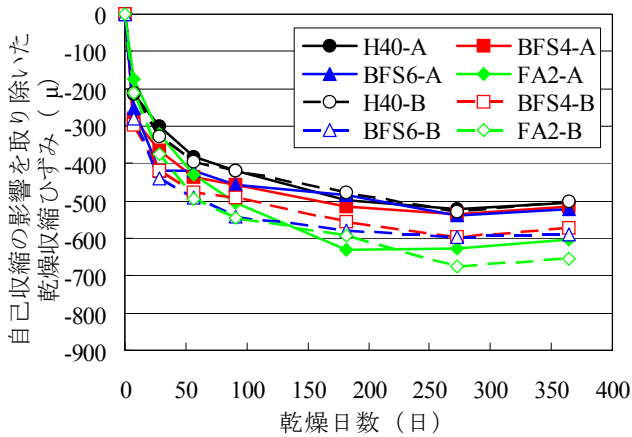


図-6 乾燥収縮ひずみ（養生 A, 養生 B）

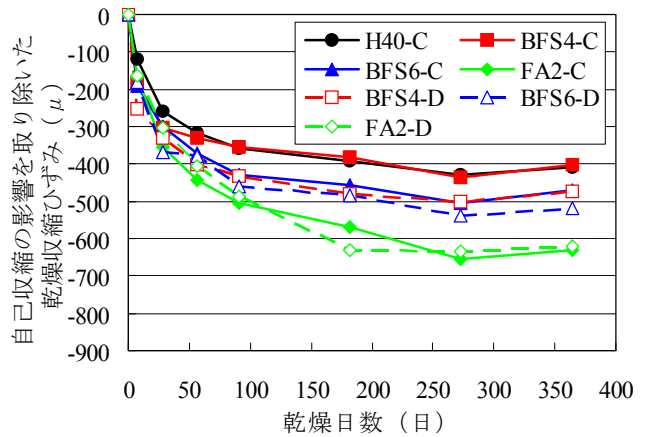


図-7 乾燥収縮ひずみ（養生 C, 養生 D）

を使用した配合はいずれも初期の変化量が大きく、自己収縮と同じような傾向を示すことから、その影響が大きく現れているものと推察される。養生 B と養生 A を比較すると、早強のみの配合では、ほとんど同じような傾向を示すのに対し、とくに高炉スラグ微粉末を使用した配合において、養生 B のほうが 100~150 μ 程度増加しており、養生の影響が大きいことが分かる。

養生 C の場合（蒸気養生）、早強のみの配合が最も長さ変化量が小さく、続いて高炉スラグ微粉末 6000、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末 4000 の順に大きくなっている。また、養生 C と養生 D ではほとんど変わらない結果となっていることから、蒸気養生後に水中養生しても長さ変化に与える影響は小さいと推察される。

高炉スラグ微粉末 4000 を使用した配合を除いては、JSCE の推定値とほぼ同様の傾向となった。

（3）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-6 および図-7 に示す。

養生 A の場合、高炉スラグ微粉末を使用した配合は早強のみの配合とほぼ同程度のひずみとなっている。一方、フライアッシュを使用した配合は、最終的に 100 μ 程度大きくなっている。養生 B の場合は養生 A に比べて、高炉スラグ微粉末を使用した配合でいずれも 100 μ 程度大きくなっており、養生期間が乾燥収縮に与える影響が大きいことが確認された。

養生 C の場合は、高炉スラグ微粉末 6000 を使用した配合で他と比べて少しひずみが大きい。また、フライア

ッシュを使用した配合は、早強のみの配合と比べると最終的に 200 μ 程度大きくなっている。養生 D については、高炉スラグ微粉末 6000 とフライアッシュを使用した配合では、養生 C とほぼ変わらないが、高炉スラグ微粉末 4000 を使用した配合では、逆に大きくなる結果となった。

フライアッシュを使用した配合の乾燥収縮が大きくなった要因としては、フライアッシュのポズラン反応がかなりゆっくりと進むため、本試験のように材齢初期から乾燥を受けた場合、ポズラン反応の進展が十分ではなく、見掛け上、水セメント比が大きい配合となることが大きな要因ではないかと推察される。

高炉スラグ微粉末が乾燥収縮に与える影響については、養生の影響を受けるものの、早強のみの場合とあまり変わらないことが確認され、収縮全体として見れば、主に自己収縮に大きく影響すると言える。

4. 塩分浸透に関する試験結果

浸漬期間 180 日における塩化物イオン量分布を図-8 および図-9 に示す。また、それぞれの測定結果に対し、JSCE-G572 に準拠して回帰した見掛けの拡散係数を図-10 に示す。

いずれも表面からの深さ 0~20mm までは塩分の浸透が見られるものの、20mm 以降は早強のみの配合やフライアッシュを使用した配合で微量に浸透が見られる程度で、30mm 以降はほぼ 0 となっている。

見掛けの拡散係数については、養生 A, B の場合、高炉スラグ微粉末を使用した配合では、いずれも早強のみの配合に比べて半分程度であり、塩分浸透に対する抵抗性が高いことが改めて確認された。現状では、高炉スラグ微粉末 4000 と高炉スラグ微粉末 6000 では大きな差は見られない。一方、フライアッシュを使用した配合につ

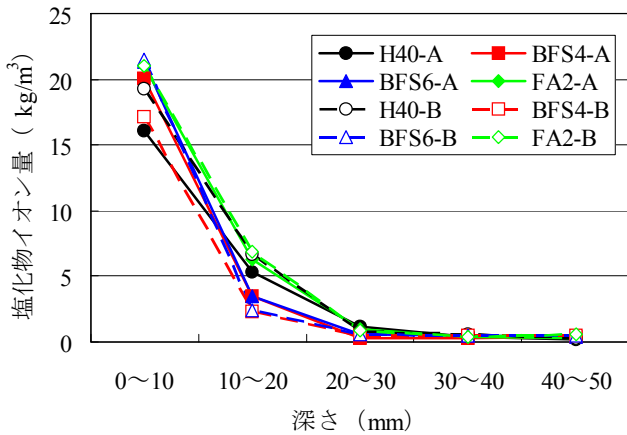


図-8 塩化物イオン量分布 (養生 A, 養生 B)

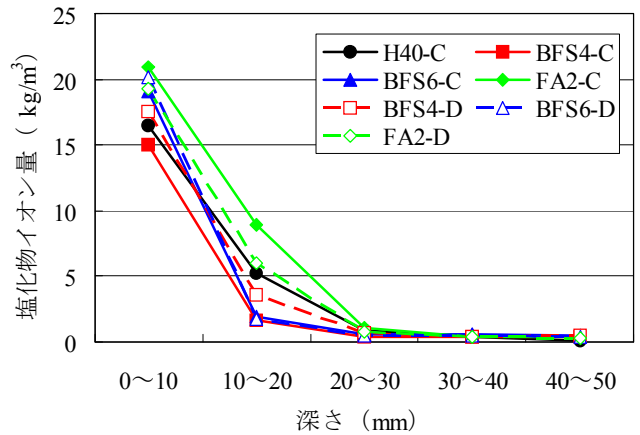


図-9 塩化物イオン量分布 (養生 C, 養生 D)

いては、早強のみの配合に比べて若干見掛けの拡散係数が小さくなる程度であった。全体的に養生 A と養生 B にあまり差がないことから、本養生期間では、塩分浸透性に与える影響は小さいものと考えられる。

養生 C, D の場合では、高炉スラグ微粉末を使用した配合で見掛けの拡散係数が小さくなっていることは、養生 A, B の場合と同様であるが、高炉スラグ微粉末 4000 については、養生 D のほうが大きくなっている。測定値のバラツキも考えられるが、前述の乾燥収縮においても養生 D のほうが大きくなっていることから、せつこうの影響なども含めて検討する必要があると考えられる。

フライアッシュを使用した配合については、早強のみの配合に比べて、養生 C の場合に見掛けの拡散係数がかなり大きくなっている。前述したように、材齢があまり進んでいない段階では、見掛け上、水セメント比が大きい配合となることが影響している可能性がある。よって、フライアッシュについては、もう少し長期的な結果を見て判断する必要があると考えられる。

5. 発熱特性に関する試験結果

簡易断熱試験の結果を図-11 に示す。早強のみの配合では注水後約 24 時間で最高温度 52℃に達したが、高炉スラグ微粉末を使用した配合では、高炉スラグ微粉末 4000 で約 36℃、高炉スラグ微粉末 6000 で約 38℃、フライアッシュを使用した配合では約 40℃であり、10℃以上の相違が見られた。また、混和材を使用した配合は、早強のみの配合と比べて、最高温度に到達する時間が遅くなっている点が特徴的である。

断熱温度上昇を表す一般的な式を以下に示す。

$$Q(t) = Q_{\infty} \left(1 - e^{-r(t-t_0)^s} \right) \quad (1)$$

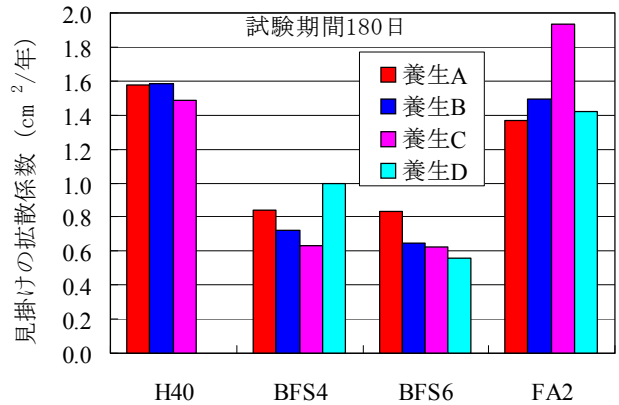


図-10 見掛けの拡散係数

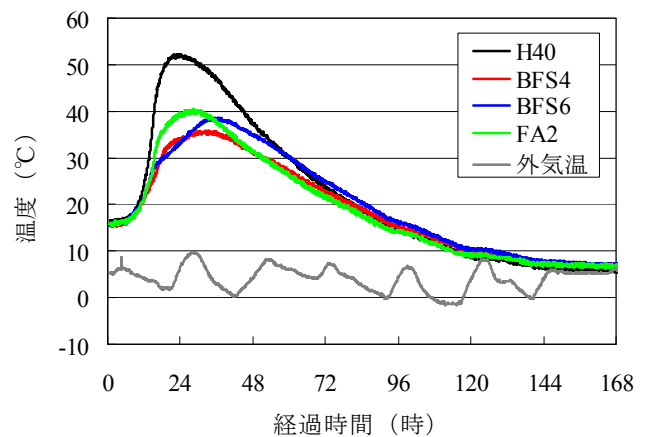


図-11 簡易断熱試験結果

ここに、 Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 (°C), r, s : 温度上昇速度に関するパラメータ, t : 材齢 (日), t_0 : 温度上昇の原点 (日)

本結果に対し、式(1)にて逆解析を行った場合、係数を変化させることで最高温度や到達時間を合わせることは可能であるが、温度勾配の変化を合わせることはでき

ない。そこで、岸らによる複合水和発熱モデル⁵⁾により逆解析を行った。本モデルはセメントのクリンカー鉱物単位や高炉スラグ微粉末、フライアッシュといった混和材単位の発熱特性を組み合わせたモデルであり、それぞれの温度依存性が考慮されている。

本モデルによる逆解析の結果を図-12に示す。なお、凡例末尾のRはそれぞれの回帰値(逆解析)を示す。高炉スラグ微粉末配合では勾配の変化などが良好に再現されており、全体的に良い合致が見られた。ただし、フライアッシュについては乖離が大きいため、そのままでの適用は難しいと考えられる。

逆解析で得られた断熱温度上昇曲線を図-13に示す。

なお、凡例末尾のOは式(1)による逆解析結果を、灰破線はコンクリート標準示方書[設計編]2012年制定による早強のみの配合の推定値を示す。

混和材を使用した配合では、早強のみの配合に比べていずれも勾配が緩やかであり、最高到達温度も若干小さくなっている。断熱温度上昇曲線は簡易断熱試験結果ほど相違が明瞭ではないことから、温度履歴によって発熱特性も大きく変わるものと推察される。式(1)で逆解析した場合には、複合水和発熱モデルと比べると温度勾配が変化するあたりまではそれ程大きな乖離は見られないが、それ以降の温度の伸びがないことが大きく異なっている。このことは、マッシュな構造物や初期温度が高い場合での解析において、コンクリート温度を過小評価する可能性があると考えられる。

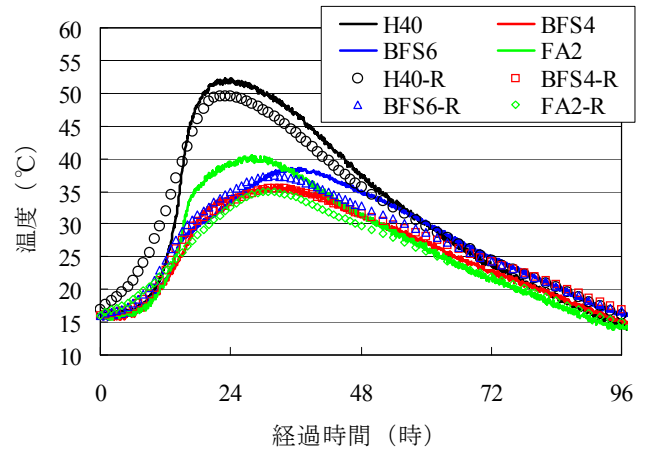


図-12 逆解析結果

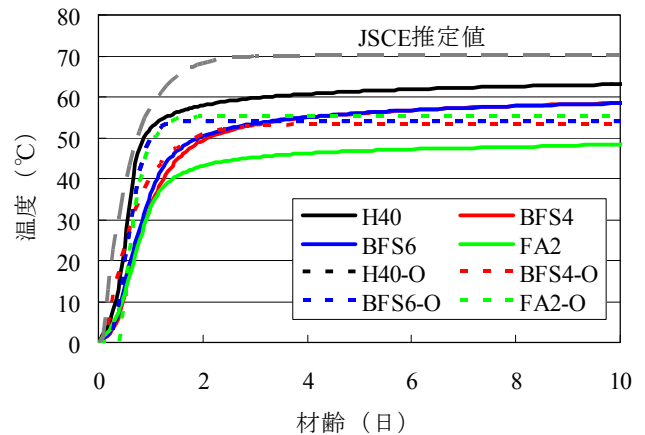


図-13 逆解析による断熱温度上昇曲線

7. まとめ

今回の試験で得られた知見を以下に示す。

- ① いずれの養生方法においても、高炉スラグ微粉末を使用す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使用するとかなり小さくなる。
- ② 最終的な長さ変化量は、養生を十分に行えば、混和材を使用してもあまり大きな差異はない。ただし、乾燥収縮に着目するとフライアッシュを使用した場合、他よりも大きくなる可能性がある。
- ③ いずれの養生方法においても、高炉スラグ微粉末を使用すると塩分浸透に対する抵抗性は向上する。フライアッシュについては、通常の蒸気養生では十分に効果が得られない可能性がある。
- ④ 混和材を使用した場合、小型の簡易断熱試験においても発熱特性に違いが見られ、その発熱特性はフライアッシュを使用した配合を除けば複合水和発熱モデルにより比較的良好に再現できる。

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) 土木学会：循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術，コンクリートライブラリー132，2009.12
- 3) 斯波明宏，谷口秀明，樋口正典，佐々木亘：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，三井住友建設技術開発センター報告，No.10，pp.39-44，2012
- 4) 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
- 5) 岸利治，前川宏一：高炉スラグおよびフライアッシュを用いた混合セメントの複合水和発熱モデル，土木学会論文集，No.550/V-33，pp.131-143,1996.11