

早強セメントを用いた環境負荷低減型コンクリートに関する実験的研究

三井住友建設(株) 博士(工学) ○斯波 明宏
 三井住友建設(株) 正会員 博士(工学) 谷口 秀明
 三井住友建設(株) 正会員 博士(工学) 樋口 正典

Abstract : 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, shrinkage, chloride permeation and hydration heat to apply the concrete 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 depend on admixtures are different in small simplified adiabatic apparatus.

Key words : High Early Strength Cement , Strength , 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, 早強セメントに高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いた配合について, 基礎物性となる圧縮強度, 自己収縮および乾燥収縮, 塩分浸透性状, 発熱特性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について検討を行った。

2. 試験概要

2. 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 (BFS4) と 6000 (BFS6) の 2 種類を, フライアッシュは JIS 規格の II 種 (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. 2 養生方法

養生方法については, 標準養生と工場製品を想定した蒸気養生の 2 つの養生方法で試験を行った。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°C で 5 時間養生したのち, 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°C, 湿度 60% の気中養生とした。

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 (kg/m ³)								高性能AE減水剤 (B×%)
				W (水)	B(結合材)			S		G		
					C (セメント)	混和材		S1 (砕砂)	S2 (山砂)	G1 (碎石)		
						H	BFS4				BFS6	
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

2. 3 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠して行った。試験材齢は標準養生が 3 日, 7 日, 28 日, 126 日, 蒸気養生は 1 日, 7 日, 28 日, 126 日とした。

2. 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。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、測定開始材齢は標準養生は材齢 7 日, 蒸気養生は材齢 1 日とした。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。

2. 5 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 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。

2. 6 簡易断熱試験

発熱特性を確認するため、簡易断熱試験を行った。試験体はΦ150×300mmとし、厚さ 200mmの発泡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. 圧縮強度試験結果

3. 1 混和材の影響

各配合における標準養生と蒸気養生の圧縮強度を図-2 および図-3 に示す。

混和材を使用した配合は早強のみの配合と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。標準養生の場合、おおむね高炉スラグ微粉末 6000>高炉スラグ微粉末 4000>フライアッシュの順に圧縮強度が小さくなっているが、材齢 3 日ではあまり差がない結果となっている。圧縮強度の増進については、混和材を用いた配合は早強のみの配合に比べて大きく、とくに高炉スラグ微粉末 6000 を用いた配合については材齢 28 日で早強のみの配合とほぼ同等にまで増進している。

一方、蒸気養生の場合には、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

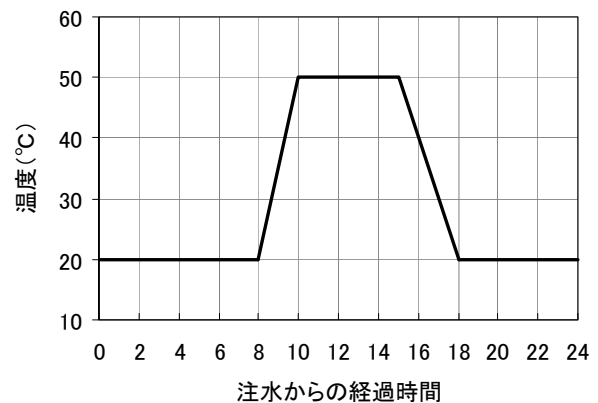


図-1 蒸気養生の温度設定

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。

3. 2 静弾性係数

標準養生と蒸気養生における圧縮強度と静弾性係数の相関を図-4 に示す。凡例末尾の N は標準養生、S は蒸気養生を表している。なお、図中の黒破線はコンクリート標準示方書 [設計編] 2012 年制定に示される値である。

静弾性係数については、フライアッシュを用いた配合において若干高くなっているものの、全体的に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、各混和材を用いた配合が早強のみの配合とほぼ同じ性状であることから、本試験範囲では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見られなかった。

4. 自己収縮に関する試験結果

標準養生 (20℃封緘状態での測定) と蒸気養生 (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-5 および図-6 に示す。図中の黒破線は日本コンクリート工学会 (JCI) 「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」による推定値である (W/C=40%)。

いずれの養生方法においても高炉スラグ微粉末を用い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。

フライアッシュを用いた配合では、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、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 を用い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。

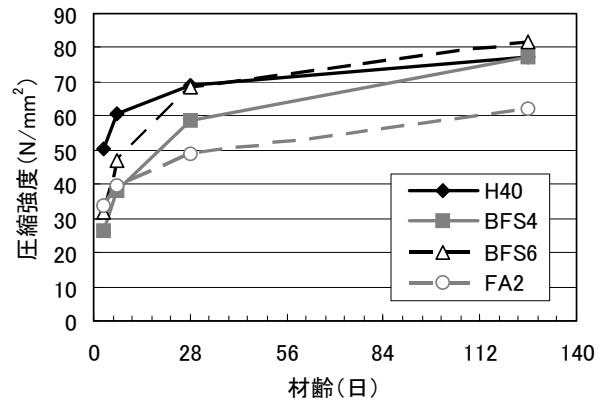


図-2 圧縮強度測定結果 (標準養生)

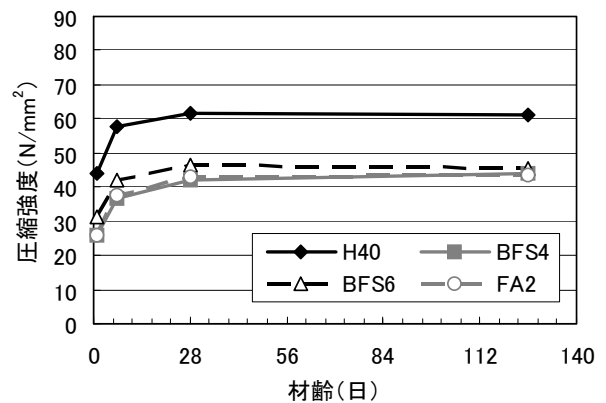


図-3 圧縮強度測定結果 (蒸気養生)

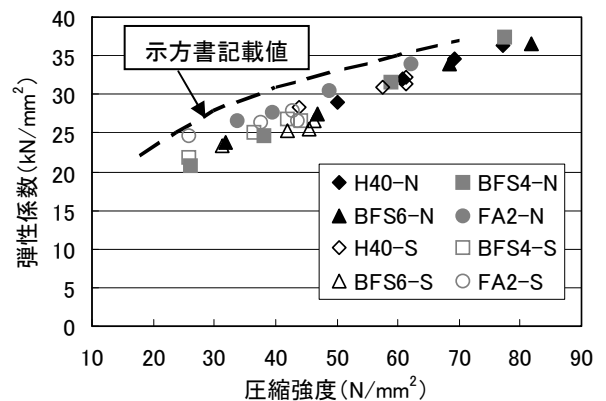


図-4 圧縮強度と静弾性係数の相関

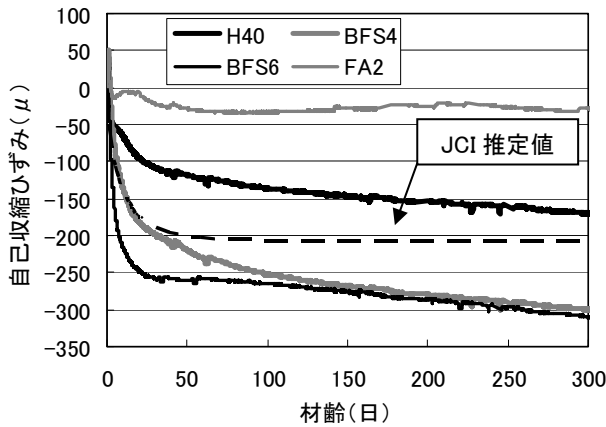


図-5 自己収縮測定結果 (標準養生)

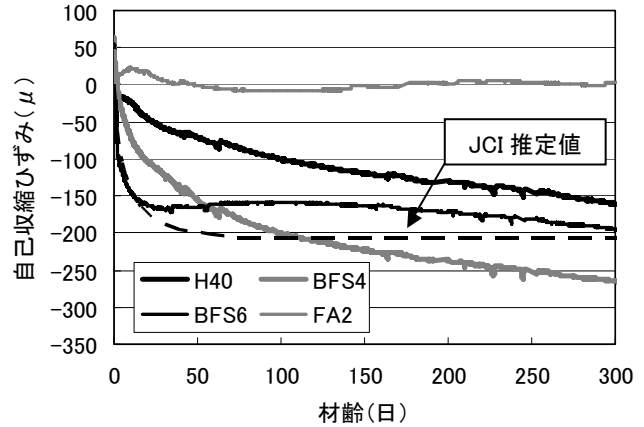


図-6 自己収縮測定結果 (蒸気養生)

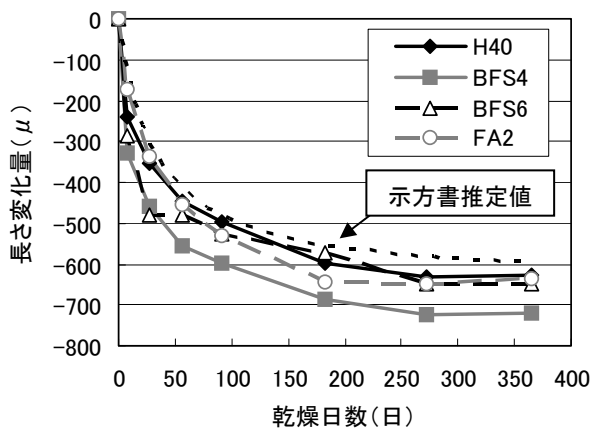


図-7 長さ変化測定結果 (標準養生)

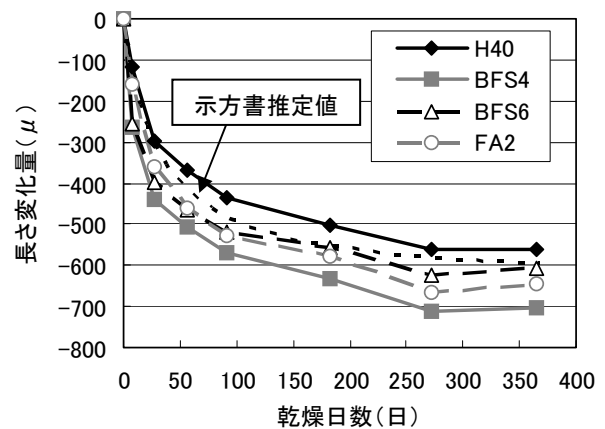


図-8 長さ変化測定結果 (蒸気養生)

5. 乾燥収縮に関する試験結果

乾燥期間 365 日までの長さ変化測定結果を図-7 および図-8 に示す。図中の黒点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。

標準養生の場合 (材齢 7 日後から測定), 高炉スラグ微粉末 4000 を用いた配合を除いては, 最終的にはほぼ同じような長さ変化量となった。高炉スラグ微粉末を用い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。

蒸気養生の場合 (材齢 1 日後から測定), 早強のみの配合が最も変化量が小さく, 高炉スラグ微粉末 4000 を用いた配合が最も大きくなっている。標準養生と比較すると, 早強のみの配合が最終的な変化量が小さくなっているが, 混和材を用いた配合はどちらもほぼ同じような変化量である。本結果と自己収縮測定結果を鑑みると, 高炉スラグ微粉末を用いた配合については, 純粋な乾燥収縮 (長さ変化から自己収縮相当分を差し引いた値) は早強のみの配合とあまり変わらないものと推察されるが, フライアッシュを用いた配合については, 早強のみの配合よりも大きくなるものと推察される。

6. 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-9 および図-10 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-11 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用い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。全体的には蒸気養生試験体のほうが, 塩化物イオンの浸透量が少ない傾向にある。

回帰による見掛けの拡散係数を比較した結果、高炉スラグ微粉末を用いた配合では、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、高炉スラグ微粉末の粉末度による違いはあまり見られない。一方、フライアッシュについては、標準養生で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ものの、蒸気養生では逆に大きくなっている。フライアッシュのポゾラン反応が非常にゆっくりなため、材齢があまり進んでいない段階では、水結合材比ではなく水セメント比の影響を大きく受けている可能性がある。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。

7. 発熱特性に関する試験結果

簡易断熱試験の結果を図-12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 4000 を用いた配合では約 36℃、高炉スラグ微粉末 6000 を用いた配合では約 38℃、フライアッシュを用いた配合では約 40℃であり、10℃以上の相違が見られた。また、混和材を用いた配合は、いずれも最高温度到達時間が遅くなっている点も特徴的である。

断熱温度上昇を表す際によく用いられるのが以下の式である。

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

ここに、 Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 (℃) ,
 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到達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(図-13参照)。そこで、岸らによる複合水和発熱モデル⁴⁾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一例を図-13に示す。とくに高炉スラグ微粉末を用いた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-14に示す。なお、黒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、灰破線は式-1による早強のみの配合の逆解析値を示す。

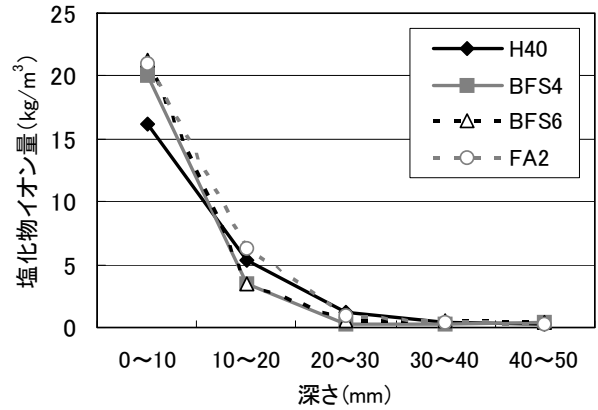


図-9 塩化物イオン量分布 (標準養生)

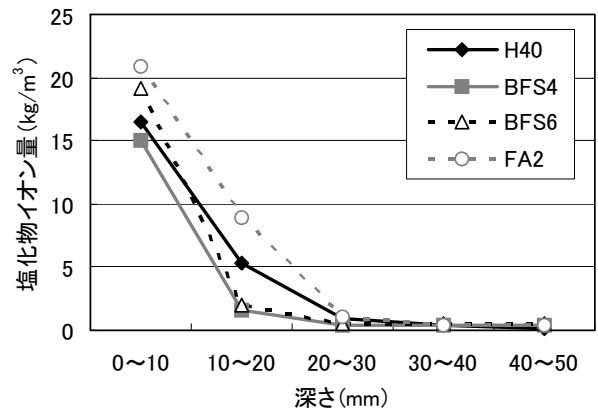


図-10 塩化物イオン量分布 (蒸気養生)

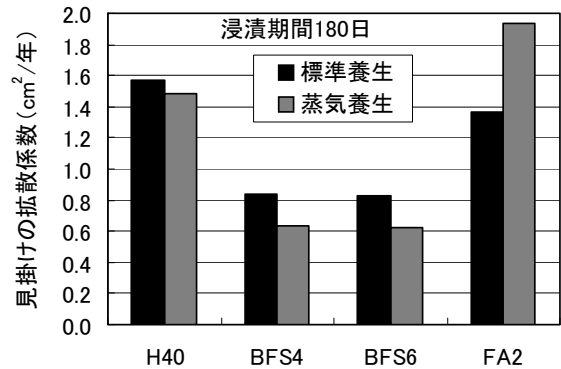


図-11 見掛けの拡散係数

混和材を用いた配合では、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。混和材を用いた配合の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。早強のみの配合の場合、式-1で逆解析した場合と比べると温度勾配が変化するあたりまではほぼ同じ傾向であるが、それ以降の温度の伸びが大きく異なっている。これは温度依存性の影響が現れているものと考えられる。

8. まとめ

今回の試験で得られた知見を以下に示す。

- 混和材を用いた場合、いずれも材齢3日では圧縮強度にあまり差が見られなかった。また、蒸気養生の場合には、いずれもほぼ同じような強度発現を示した。
- いずれの養生方法においても、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。
- いずれの養生方法においても、高炉スラグ微粉末を用い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。
- 混和材を用いた場合、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用い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。

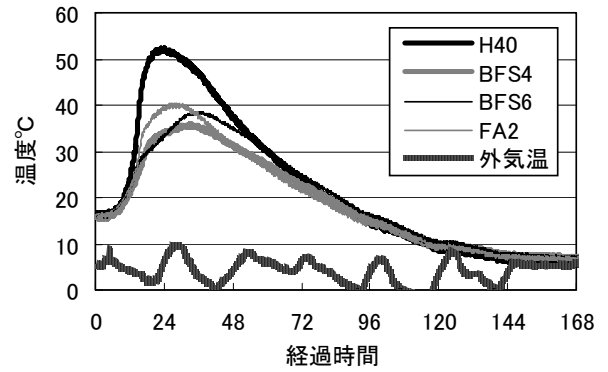


図-12 簡易断熱試験結果

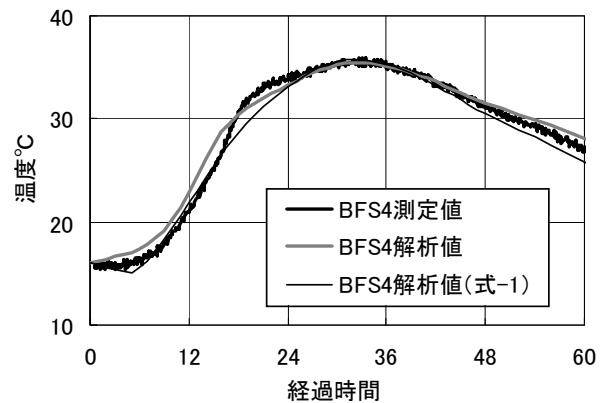


図-13 逆解析結果の一例 (BFS4)

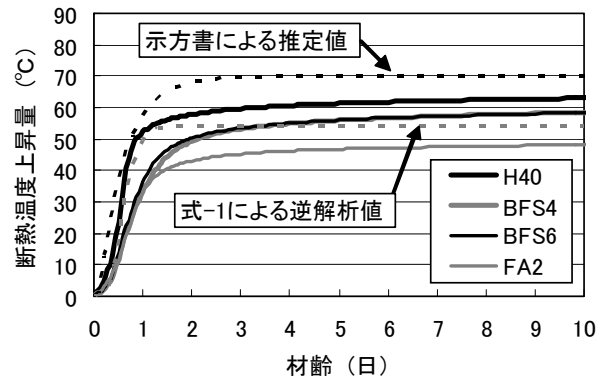


図-14 逆解析による断熱温度上昇曲線

【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) 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) 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