論文　プレストレストコンクリート部材に高炉スラグ微粉末を積極的に利用する際の各種不利要因の改善

川口　千大[*1]・北野　勇一[*1]・安東　功[*2]・堀池　一男[*3]

要旨：本研究では，蒸気養生を行い製作される設計基準強度 50N/mm^2 のプレストレストコンクリート部材を対象とし，高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートを適用する際に不利要因となり得る初期強度の低下や収縮ひずみ・水和発熱の増大を改善するための材料・施工面の対応について実験的に検討した。その結果，蒸気養生あるいはこれに続く後養生といった施工面の対応は強度特性の改善効果が限定的であること，一方，材料面の対応としてとくに SO_3 量を増した高炉スラグ微粉末 8000 の使用は強度・収縮・発熱の諸特性を効果的に改善することが確認された。

キーワード：プレストレストコンクリート，高炉スラグ微粉末，蒸気養生

1. はじめに

プレストレストコンクリートに用いるコンクリートは初期強度の確保が重要であり，施工にあたっては一般に早強ポルトランドセメントを使用して強度発現を早める。一方，環境に配慮するには高炉スラグ微粉末の利用が合理的となるが，とくに比表面積が小さい高炉スラグ微粉末を用いる場合は初期強度が低くなり，早強性が求められることと相反する。また，高強度化や早強化を図ったコンクリートは自己収縮ひずみや水和熱が増すため，高炉スラグ微粉末を用いることで水結合材比の低下やセメント量の増加につながると，これに起因したひび割れの発生が懸念される。このようにプレストレストコンクリート構造物への高炉スラグ微粉末の適用にあたっては，その利用方法を誤ると，強度特性（初期強度の低下），収縮特性（自己収縮を含めた収縮ひずみの増大），発熱特性（水和発熱の増大）が不利要因となり得るため，より積極的に利用することが敬遠されている。

本研究では，プレストレストコンクリート構造物に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートを適用するための課題の一つとして強度・収縮・発熱の各特性に着目し，これらの特性が不利要因とならないための材料・施工面の対応について実験的に検討することにした。検討にあたっては，蒸気養生を行い製作される設計基準強度 50N/mm^2 のプレストレストコンクリート部材を対象とした。また，得られた実験結果を「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針」[1)]（以下，スラグ指針と略す）等と対比した。この意図は，本研究で対象としている水結合材比 40%程度以下の早強ポルトランドセメント使用コンクリートで確認される諸特性が，スラグ指針で標準とする水結合材比 50%前後を想定した普通ポルトランドセメント使用コンクリートで得られている知見と一致するかどうかについて検証するためである。

2. 実験方法

2.1 実験条件

実験条件を**表－1**に示す。実験は着目点と対応点の組合せにより 5 シリーズを実施した。実験 A・B は施工面の対応として蒸気養生あるいはこれに続く後養生の方法を変えて強度特性に及ぼす影響を，実験 C・D・E は材料面の対応として高炉スラグ微粉末の比表面積や三酸化硫黄の量（以下，SO_3 量と略す）を変化させ，強度・収縮・発熱の諸特性に及ぼす影響を検討した。

配合条件は水結合材比（W/B）一定と強度一定の 2 パターンとし，後者については材齢 1 日（プレストレス導入時）で σ_{1S}=35N/mm^2，材齢 7 日（製品出荷時）で σ_{7S}=50 N/mm^2 の圧縮強度を確保することを目標とした。また，高炉スラグ微粉末は JIS A6206 に適合する範囲（SO_3 量が 4.0%以下）のものを使用し，早強性を確保しつつできるだけ環境への配慮を行う観点より早強ポルトランドセメントをベースとして高炉スラグ微粉末の置換率（以下，置換率と略す）を 50%としたコンクリートについて主に検討することにした。

なお，上記以外の実験条件については，以下 2.2 節および 2.3 節にて詳述する。

2.2 コンクリートの使用材料および配合

実験に用いたコンクリートの使用材料を**表－2**に示す。セメントは早強ポルトランドセメント（HPC）を，高炉スラグ微粉末は JIS A6206 に適合する高炉スラグ微粉末

*1 川田建設（株）　技術部　(正会員)
*2 川田建設（株）　西日本統括支店大分事業所九州工場
*3 川田建設（株）　東日本統括支店北関東事業所那須工場

表－１　実験条件

シリーズ	着目点	対応点	配合条件	水結合材比(%)	スラグ種別	置換率(%)	SO_3量(%)	蒸気養生	後養生
実験 A	強度特性	蒸気養生	W/B 一定	29,34,39	BF4 BF6	50	BF4:2.1 BF6:0	55℃×4hr 55℃×6hr	無
実験 B		後養生	強度一定	**表－３**参照		0,50		2.3 節(1)参照	
実験 C		比表面積 SO_3量	W/B 一定	38	BF6 BF8		0,2.3,3.6	45℃×6hr	無
実験 D	収縮特性			33,38			3.6	2.3 節(2)参照	
実験 E	発熱特性		強度一定	**表－４**参照				2.3 節(3)参照	

注）SO_3量とは高炉スラグ微粉末中に含まれる三酸化硫黄の量を，蒸気養生の欄は（最高温度）×（保持時間）を示す。

4000（BF4）と高炉スラグ微粉末 6000（BF6）および高炉スラグ微粉末 8000（BF8）の 3 種類を使用した。上記以外の材料については，実験 A・B は K 工場（大分県杵築市），実験 C・D・E は N 工場（栃木県大田原市）で使用されている材料を用いた。

表－１において配合条件を W/B 一定としたコンクリート配合は，各工場の実績配合を参考に定めた。また，配合条件を強度一定としたコンクリート配合は強度回帰式を求めた上で所定の強度が得られるように配合を決定した。その結果を**表－３**および**表－４**に示す。配合 50-HPC は早強ポルトランドセメントのみを用いた配合であり，求めた強度回帰式が過去に求めたものと概ね一致したことから，各工場の実績配合をそのまま用いることにした。単位水量は実験 A・B で 160kg/m^3，実験 C・D・E で 162kg/m^3 とした。スランプは 12±2.5cm，空気量は 4.5±1.5%を目標とし，これを確保するように混和剤の量を調整した。

2.3 供試体の作製および試験方法

(1) 強度特性試験

2.2 節に示した使用材料および配合にてコンクリートの練混ぜを行い，所定のスランプ・空気量であることを確認した後，φ10×20cm の円柱供試体を作製した。これらの作業は温度 20±3℃，湿度 60%以上に保った試験室にて実施した。また，供試体の蒸気養生および後養生については，以下の方法にて実施した。

- 実験 A では最高温度 55℃を 4 時間保持する方法（蒸気 55℃×4hr）と，初期強度の改善を期待するため保持時間を 6 時間に延長する方法（蒸気 55℃×6hr）にて蒸気養生を行った。
- 実験 B では蒸気 55℃×4hr による蒸気養生を行ったもの（蒸気のみ）と，後養生として散水養生を 3 日間行ったもの（蒸気+散水 3 日），ケイ酸塩系の改質材をメーカー使用量塗布したもの（蒸気+改質材）の 3 方法の養生を行った。
- 実験 C では最高温度 45℃を 6 時間保持する方法（蒸気 45℃×6hr）にて蒸気養生を行った。

表－２　コンクリートの使用材料

材料	記号	実験 A・B	実験 C・D・E
水	*W*	水道水，密度 1.00	地下水，密度 1.00
セメント	*HPC*	密度 3.14，比表面積 4550cm^2/g	密度 3.13，比表面積 4650cm^2/g
混和材	*BF4*	密度 2.91，比表面積 3920cm^2/g	---
	BF6	密度 2.91，比表面積 5910cm^2/g	密度 2.91，比表面積 6200cm^2/g
	BF8	---	密度 2.91，比表面積 8200cm^2/g
細骨材	*S*	砕砂 表乾密度 2.63	砕砂 表乾密度 2.64
粗骨材	*G*	砕石 2005 表乾密度 2.59	砕石 2005 表乾密度 2.66
混和剤	*SP*	高性能 AE 減水剤標準形（Ⅰ種）	
	AE	AE 剤（Ⅰ種）	

注）*HPC* は早強ポルトランドセメント，*BF4*・*BF6*・*BF8* は高炉スラグ微粉末 4000・6000・8000 を示す。

表－３　コンクリート配合条件（実験 B）

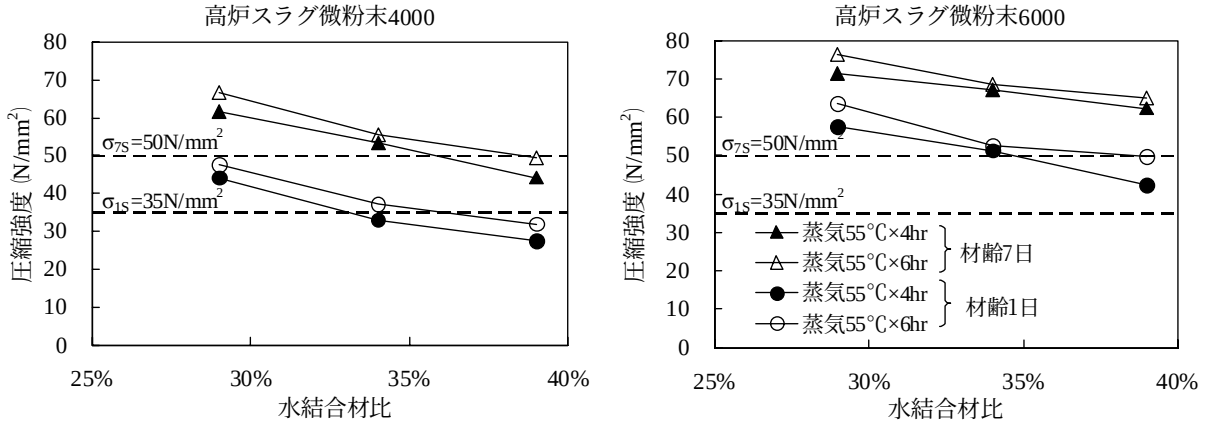
配合名	水結合材比(%)	単位水量(kg/m^3)	スラグ種別	置換率(%)
50-HPC	36.5	160	---	0
50-BF4	29.0		BF4	50
50-BF6	38.0		BF6	

表－４　コンクリート配合条件（実験 E）

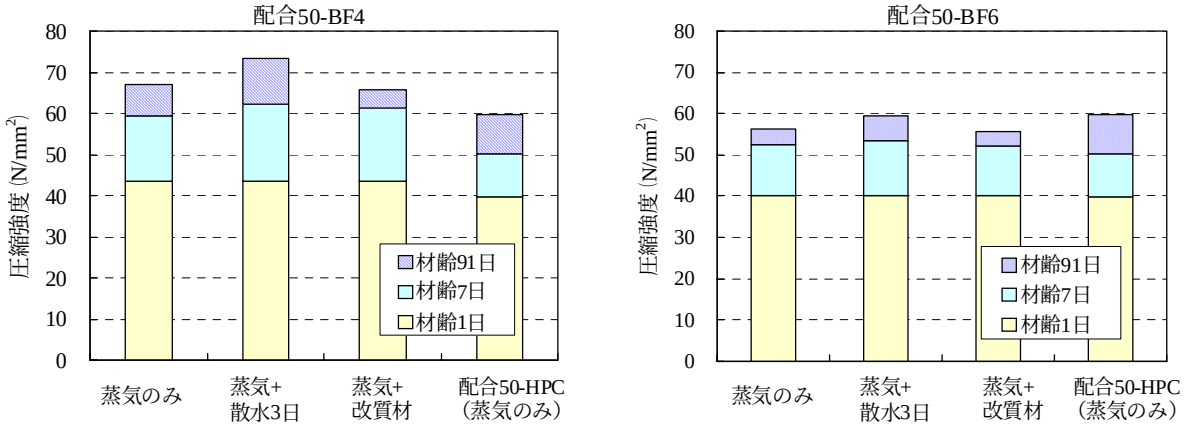
配合名	水結合材比(%)	単位水量(kg/m^3)	スラグ種別	置換率(%)
50-HPC	38.4	162	---	0
50-BF6	35.5		BF6	50
50-BF8	41.2		BF8	

蒸気養生および後養生を終えた供試体は，所定の材齢まで，前述の試験室にて封をしない状態で保管した。

上記の手順にて作製した供試体を用い，所定の材齢（ただし，材齢 1 日は注水から 24±1 時間）の時点で JIS A1108 に従い圧縮強度試験を実施した。



図－１　蒸気養生の工夫が強度発現性状に及ぼす影響（実験 A）



図－２　蒸気養生に続く後養生の工夫が強度発現性状に及ぼす影響（実験 B）

(2) **収縮特性試験および発熱特性試験**

収縮特性を確認する供試体は，JIS A1129 附属書 A に従い作製した。具体的には，供試体は 10×10×40cm の角柱とし，蒸気養生を行わずに材齢 1 日で脱枠後，ただちに 20±2℃の水中に材齢 7 日まで浸せきした。また，材齢 7 日以後は供試体を温度 20±2℃，湿度 60±5%に保つ環境にて保管した。収縮特性試験は，供試体に埋込み型ひずみ計を設置し，コンクリートの打込み直後より材齢 57 日（乾燥期間 50 日）まで測定した。

発熱特性を確認する供試体は，**表－４**に示す 4 種類のコンクリートを用い，JASS 5T-705[2)]に示される 100×100×100cm の上下面を厚さ 15cm の発泡スチロールにて断熱した模擬柱を製作した。発熱特性試験は，模擬柱の中心に熱電対を設置し，コンクリートの打込み直後より材齢 14 日まで測定した。

3. 施工面の対応による強度特性の改善

3.1 蒸気養生における対応策（実験 A）

蒸気養生中の最高温度の保持時間を変化させた場合のコンクリートの圧縮強度試験結果を**図－１**に示す。図にはプレストレス導入時（σ_{1S}）と製品出荷時（σ_{7S}）に求められる圧縮強度を併せて示した。これより，蒸気 55℃×6hr（最高温度の保持時間を 6 時間に延長する方法）の方が，蒸気 55℃×4hr より圧縮強度が幾分大きくなっていることがわかる。

3.2 後養生における対応策（実験 B）

蒸気養生に続く後養生の有無や方法を変化させた場合のコンクリートの圧縮強度試験結果を**図－２**に示す。図には比較として高炉スラグ微粉末を用いていない配合 50-HPC（蒸気のみ）の結果を併記した。これより，材齢 91 日の圧縮強度に着目すると，蒸気養生に続き散水養生を 3 日間行ったもの（蒸気+散水 3 日）が最も高く，また，散水による強度の増加量は高炉スラグ微粉末 6000 を用いた配合 50-BF6 より高炉スラグ微粉末 4000 を用いた配合 50-BF4 の方が大きいことがわかる。しかしながら，蒸気養生後にケイ酸塩系の改質材をメーカー使用量塗布したもの（蒸気+改質材）を含め，材齢 7 日の強度増加量は最大 3N/mm^2 程度であり，初期強度についてはほとんど改善されない結果となった。

3.3 初期強度の改善効果

実験 A および実験 B を通じ，蒸気養生中の最高温度の保持時間を 4 時間から 6 時間に延長すると初期強度が若

干改善されたが（**図－１**参照），蒸気養生に続く後養生を実施した場合については材齢７日までの初期強度をほとんど改善することがなかった（**図－２**参照）。また，前者の改善効果を確認するため，実験Ａの結果より所定の強度が得られるように算出した水結合材比を**図－３**に示す。これによると，蒸気養生中の保持時間の延長は，水結合材比を最大 3%ほど大きくすることに相当するものであった。しかしながら，同図において，高炉スラグ微粉末 4000 から高炉スラグ微粉末 6000 に変更すると同じ強度特性を得るための水結合材比を 9%以上大きくできることと対比すると，この対応策の改善度合いも決して大きいとはいえない。

以上より，本検討の範囲では，施工面の対応による初期強度の改善効果は限定的であることが確認された。

4. 材料面の対応による各種特性の改善

ここでは，材料面の対応として高炉スラグ微粉末の比表面積と SO_3 量を変化させたコンクリートを用いて実験的に検討する。前者については，3 章の検討結果より，水結合材比を低減させずに所要の強度特性が得られた高炉スラグ微粉末 6000 と，さらに比表面積が大きい高炉スラグ微粉末 8000 を用いて検討を進める。

4.1 比表面積や SO_3 量が強度特性に及ぼす影響（実験Ｃ）

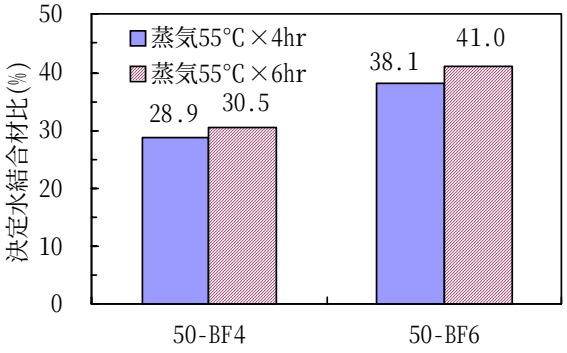
高炉スラグ微粉末中の SO_3 量を JIS A6206 に適合する範囲内で変化させた場合のコンクリートの圧縮強度試験結果を**図－４**に示す。材齢１日の圧縮強度に着目すると，高炉スラグ微粉末の比表面積を大きくすることや SO_3 量を増加させることで初期強度が向上し，後者については SO_3 量 0%の場合に比べると最大 2～4 割ほど改善されることが確認された。この理由として，本実験では蒸気養生を行うことにより強度発現が高まり，スラグ指針の「せっこうの添加はコンクリートの初期強度を若干改善させる」との記述よりも改善の度合いが大きくなったものと推察される。

一方，長期強度に関しては，スラグ指針に示されているように，SO_3 量が増えるに伴って増加の割合が小さくなる傾向であった。しかしながら，今回の実験範囲においては，**図－４**に示したように，材齢 28 日時点の圧縮強度を損なうことがないことが確認された。

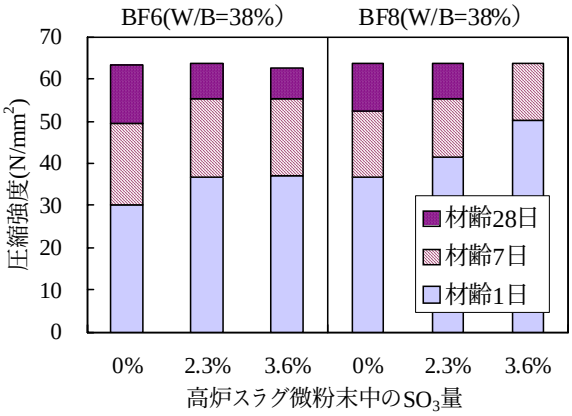
4.2 SO_3 量を増した高炉スラグ微粉末使用コンクリートの収縮特性（実験Ｄ）

4.1 節にて高炉スラグ微粉末への SO_3 の添加が初期強度の改善に有効であったことから，ここでは SO_3 量を 3.6%としたケースにて収縮特性を確認することにした。その結果の一例を**図－５**に示す。

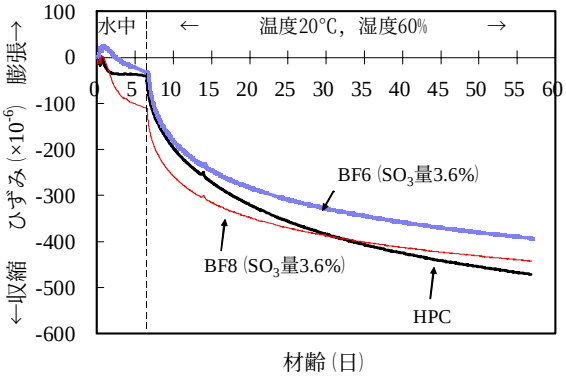
これより，供試体を水中に浸せきしている材齢７日までの期間に自己収縮によると考えられる収縮ひずみ（以下，初期収縮という）が認められ，その大きさは BF8＞HPC＞BF6 となった。ここで，BF6 については，コンクリートの打込みから材齢１日までのひずみ変化が膨張側となっている。この点については，伊代田ら [3]が報告しているように，高炉スラグ微粉末中の SO_3 量を増すことで初期膨張性が付与されたものと推察される。また，材齢７日以降の乾燥収縮ひずみの進行に着目すると，材齢１ヶ月程度で高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの方が，早強ポルトランドセメントのみを用いたコンクリ



図－３　実験Ａより決定される水結合材比



図－４　SO_3 量が強度特性に及ぼす影響（実験Ｃ）



注）各配合とも水結合材比 38%の結果を示した。

図－５　コンクリートのひずみ経時変化（実験Ｄ）

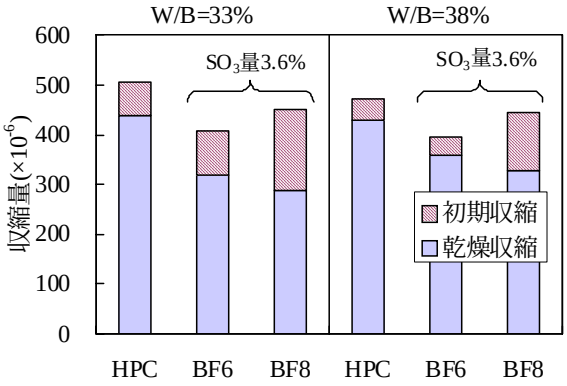
ートよりも収縮ひずみが小さくなることがわかる。このことは，スラグ指針「材齢 1 ヶ月程度以内の乾燥収縮は一般のコンクリートに比較してやや大きくなる」との記述と異なる傾向になった。この理由については，和地らの報告 [4]によると高炉スラグ微粉末中の SO_3 量を増すことで細かい細孔容積の割合が減少し，毛細管張力が減少することで乾燥収縮率が減少することなどが要因として挙げられ，早強ポルトランドセメントを用いたことの影響が現れた訳ではないものと推察される。

さらに，材齢 57 日時点における収縮ひずみを初期収縮と乾燥収縮に分離した結果を**図－6** に示す。これによると，水結合材比が小さく，スラグの比表面積が大きい方が，自己収縮に由来すると考えられる初期収縮が大きくなっている。この点については，今回検討した高炉スラグ微粉末使用コンクリートについてもスラグ指針と同様の傾向を示すことが確認された。

4.3 SO_3 量を増した高炉スラグ微粉末使用コンクリートの発熱特性（実験 E）

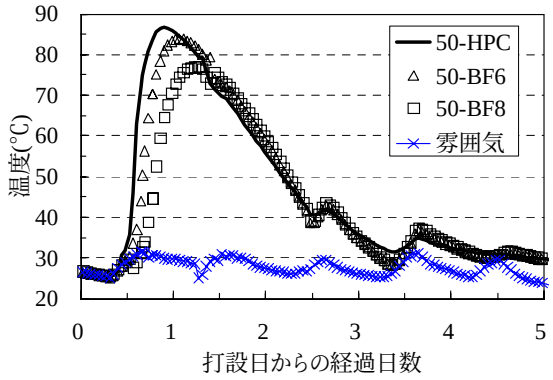
高炉スラグ微粉末中の SO_3 量は 4.2 節と同様に 3.6%とし，強度一定（設計基準強度 50N/mm^2）の配合条件の下で実施した模擬柱内部のコンクリート温度履歴を**図－7** に示す。これより，高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは，早強ポルトランドセメントのみを用いたコンクリート（50-HPC）よりも模擬柱内部のコンクリートが到達する最高温度が小さく，高炉スラグ微粉末 6000（50-BF6）よりも高炉スラグ微粉末 8000（50-BF8）を用いた方が発熱温度を低く抑制することが確認された。また，模擬柱の実測温度より各配合の温度上昇量や最高温度に到達するまでの所要時間を整理した結果を**表－5** に示す。これより，今回の高炉スラグ微粉末使用コンクリートについても，スラグ指針の「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは，水和による発熱速度が小さく，発熱量も低減される傾向にある」との記述と同様な傾向を示す結果が得られた。

次に，発熱特性の改善要因を検討するため，**図－8** に示すような模擬柱の 1/4 モデルを用いた温度解析を行い，温度上昇量を単位セメント量で除した上で実測値と比較した結果を**図－9** に示す。ここで解析条件は，既往の技術指針 [5]に従うものとし，コンクリートの発熱特性は早強ポルトランドセメントの値（図中の解析 HPC）を用いた。これより，高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの単位セメント量当たりの温度上昇量は，スラグ種別（比表面積）によらず，解析 HPC と概ね一致することがわかる。この点については，スラグ指針「高炉スラグ微粉末の比表面積が 3300 から 8000cm^2 /g 程度に変化しても，断熱温度上昇量の変化はほとんど認められない」との見解と整合したといえる。また，本研究では発熱特性に及



注）初期収縮量は材齢 7 日まで，乾燥収縮量は材齢 7 日から 57 日までの期間の収縮ひずみの増分量を示した。

図－6　自己収縮および乾燥収縮量（実験 D）

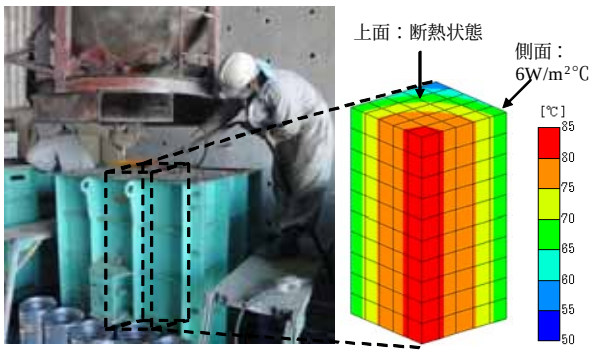


図－7　模擬柱内部コンクリートの温度履歴（実験 E）

表－5　模擬柱による発熱特性の結果（実験 E）

配合名	最高温度(℃)	初期温度(℃)	温度上昇量(℃)	所要時間(hr)
50-HPC	86.7	29.0	57.7	13.1
50-BF6	83.9	29.0	54.9	14.8
50-BF8	77.0	29.0	48.0	17.8

注）初期温度とは打込み時のコンクリート温度を，所要時間とは注水から最高温度に到達するまでの時間を示す。

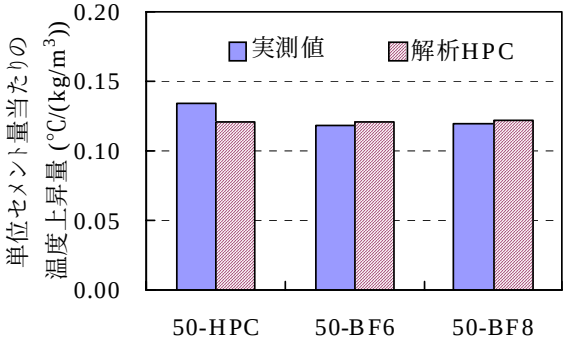


注）上面は断熱状態，側面は熱伝達率を 6W/m^2℃（シート養生）一定とした。また，コンクリート初期温度は 30℃，模擬柱の外周温度を 30℃一定とした。

図－8　温度解析モデル（実験 E）

ぼす SO_3 量の影響を検討していないものの，スラグ指針には「せっこうの添加によって最終の断熱温度上昇量が低下する」と示されており，伊代田ら[3]も SO_3 量の影響はスラグの比表面積などの要因と比較して大きくないことを報告している。したがって，今回検討した高炉スラグ微粉末使用コンクリートの発熱特性は主として単位セメント量に依存し（スラグの比表面積や SO_3 量を増すことによる影響は小さい），強度特性の観点より単位セメント量を少なくできる高炉スラグ微粉末 8000 の発熱量が最も小さくなったものといえる。

なお，早強ポルトランドセメントのみを用いたコンクリート（配合 50-HPC）の単位セメント量当たりの温度上昇量は，解析 HPC よりも 0.013℃/(kg/m^3)，温度上昇量で 6℃ほど高くなっており，高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの発熱特性はこのベースセメントの影響を受けた可能性がある。



図－９　温度上昇量の実測値と解析値の比較（実験 E）

なお，上記(2)に示した SO_3 量を増した高炉スラグ微粉末の利用にあたってはコンクリートの練上り温度の影響や各種劣化要因に対する耐久性の確認など残された課題があり，今後の継続検討が不可欠である。

5. まとめ

本研究では蒸気養生を行い製作される設計基準強度 50N/mm^2 のプレストレストコンクリート部材を対象とし，高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートを適用する際に懸念される初期強度の低下や収縮ひずみ・水和発熱の増大を改善するための材料・施工面の対応について実験的に検討した。その結果，次のことが明らかになった。

(1) 施工面の対応として蒸気養生中の最高温度の保持時間を延長すると初期強度が若干改善されたが，後養生を行ったとしても材齢 7 日までの初期強度の改善には至らなかった。このことから，施工面からの対応による初期強度の改善効果は限定的であることが確認された。

(2) 材料面の対応として SO_3 量を増した高炉スラグ微粉末 6000 や高炉スラグ微粉末 8000 を用いた結果，強度・収縮・発熱の諸特性を改善することが確認された。とくに，初期強度の確保や乾燥収縮量の低減および温度上昇量の抑制には SO_3 量を増した高炉スラグ微粉末 8000 が，自己収縮を含めた収縮ひずみの低減については SO_3 量を増した高炉スラグ微粉末 6000 の使用が効果的であることがわかった。

謝辞：本研究に用いた高炉スラグ微粉末は（株）デイ・シイより提供を受けた。付して謝意を表する。

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：高強度コンクリート施工指針（案）・同解説，pp.226-227，2005.2
3) 伊代田岳史，兼安真司，檀康弘：高炉セメント中のスラグ粉末度と石こう量が水和発熱と自己収縮特性に与える影響，コンクリート工学年次論文集 Vol.29，No.1，pp.99-104，2007.
4) 和地正浩，米澤敏男，三井健郎，井上和政：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの物性に及ぼす SO_3 量の影響，コンクリート工学年次論文集 Vol.33，No.1，pp.203-208，2011.
5) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書設計編，pp.331-344，2008.3