

## 高炉スラグ微粉末を混和した高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす養生条件の影響

九州大学大学院 学生会員 修士(工学) ○尾上幸造  
 同上 正会員 工学博士 松下博通  
 同上 正会員 修士(工学) 佐川康貴  
 新日鐵高炉セメント(株) 博士(工学) 前田悦孝

### 1. はじめに

高炉スラグ微粉末は、コンクリートの耐久性向上に有用な混和材料として知られており、建設工事の環境負荷低減の観点からも利用拡大が望まれている。近年、飛来塩分や道路に散布される融雪剤によるプレストレストコンクリート(以下、PC)の塩害劣化が顕在化しており、その対策の一つとして、高炉スラグ微粉末の適用が検討されている<sup>1)</sup>。しかし、従来から高炉セメントの混和材料として使用されている高炉スラグ微粉末4000は、初期強度発現が遅く、早期に高強度が必要とされるPC構造物に適用されることはほとんどなかった。これまでに、高炉スラグ微粉末6000を使用した場合、高炉スラグ微粉末4000を使用したものに比べて早期強度発現性が改善されることが明らかとされており、PC構造物への適用が可能であると考えられる。従って、高炉スラグ微粉末6000のPC構造物への適用を図る上では、まず、プレストレスの導入などに必要とされる初期材齢での所要強度を満足でき、長期的にも安定して強度が増進できる条件を明らかにする必要がある。そこで、本研究では蒸気養生を必要とするプレテンション方式のPC構造物への高炉スラグ微粉末の適用を目的として、高炉スラグ微粉末6000を混和した高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす蒸気養生条件および脱型後の湿潤養生期間の影響を検討したものである。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料および配合

本実験で使用した材料を表-1に示す。セメントは早強ポルトランドセメント(以下、HPC)を使用し、高炉スラグ微粉末は高炉スラグ微粉末6000(以下、BFS6)、および一部比較として高炉スラグ微粉末4000(以下、BFS4)を使用した。

コンクリートの配合を表-2に示す。HPCのみを使用したコンクリートの水セメント比は、PCコンクリート工場で採用されている設計基準強度49N/mm<sup>2</sup>の配合を参考にして40%とした。高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートのスラグ置換率は、強度発現性および塩害に対する抵抗性を考慮して50%とした<sup>1), 2)</sup>。また、HPCにBFS6を混和すると、HPCのみを使用した場合と比べて初期強度発現が遅れることが知られている。そこで、本実験ではBFS6を混和したコンクリートの水結合材比をHPCのみを使用した場合より5%小さくした35%、およびHPCのみを使用した場合と同一の40%の2水準とした。以下、本文中では、HPCのみを使用したコンクリートを「HPC単味」、BFS6を混和したコンクリートを「BFS6混和」、BFS4を混和したコンクリートを「BFS4混和」と表記する。また、図中

表-1 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント 密度:3.14g/cm <sup>3</sup>
高炉スラグ微粉末	高炉スラグ微粉末6000(BFS6) 密度:2.91g/cm <sup>3</sup> 高炉スラグ微粉末4000(BFS4) 密度:2.91g/cm <sup>3</sup>
化学混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
細骨材	福岡県西浦産海砂:相ノ島海砂=2:1 密度:2.59g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	北九州市門司区産碎石2005 密度:2.72g/cm <sup>3</sup>

表-2 コンクリートの配合

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	BFS	S	G	SP
H35BFS6	35	41	145	207	207	740	1119	2.48
H40	40	42	145	363	-	782	1134	2.90
H40BFS6	40	42	145	181	181	777	1127	2.17
H35BFS4	35	41	145	207	207	740	1119	2.48

表-3 養生条件

蒸気養生の最高温度	45°C, 55°C, 65°C
脱型時間	10~24時間
脱型後の養生および養生後の環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>・気中(S)</li> <li>・3日まで水中→気中(W3)</li> <li>・7日まで水中→気中(W7)</li> <li>・28日まで水中(W28)</li> <li>・屋外(OD)</li> </ul>
気中:温度20°C, 相対湿度60%RH 水中:水温20°C	

では表-2の記号を使用した。

## 2. 2 養生の条件および養生後の環境

養生条件を表-3に示す。蒸気養生の温度は、温度を高めて強度発現を促進した場合と温度上昇を抑えて養生の時間を長くとした場合を比較するため、最高温度を45℃、55℃、65℃とする3つの温度パターンを設定した。また、脱型後の養生および環境の影響を調べるため、水中養生期間を変化させた場合、屋外に曝露した場合も検討に加えた。屋外曝露期間中の平均気温は16.9℃、降水量は90mmであった。

## 2. 3 圧縮強度の測定方法

蒸気養生終了時の圧縮強度試験は、養生槽から取り出してから約30~45分で行った。養生槽から取り出した供試体は直ちに脱型、研磨し、それ以降は試験まで20℃の恒温室内に静置した。図-1に蒸気養生槽内の温度と供試体中心部の温度変化を示す。初期の強度増進の様子を把握するため、打込み後10時間前後で強度試験に供したものは、供試体温度が外気温よりかなり高い状態でも養生槽から取り出して圧縮強度試験に供した。圧縮強度試験は、JIS A 1108に準じて行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3. 1 蒸気養生後の圧縮強度

蒸気養生の最高温度が55℃の温度パターンにおける、打込み終了からの経過時間と圧縮強度の関係を図-2に示す。水結合材比35%のBFS6混和は、水セメント比40%のHPC単味と同等の強度発現を示した。一方、水結合材比40%のBFS6混和はHPC単味と比べて圧縮強度が10N/mm<sup>2</sup>ほど下回っており、水結合材比を一定とした場合の初期強度はBFS6を混和することで低下することが確認された。

蒸気養生温度パターンを変化させた場合における圧縮強度の発現状況を図-3に示す。保持温度55℃と65℃では差が見られないものの、これらと比較して保持温度を45℃とした場合は強度発現が遅れる傾向を示した。養生時間の経過によりその差は小さくなるものの、打込みから24時間後の強度で比較しても多少低めとなった。

一般にプレテンション方式のプレストレス導入時に必要とされるコンクリートの圧縮強度は35N/mm<sup>2</sup>とされている。また、実機プラントでは、品質管理が良好な場合でも圧縮強度の変動係数は10%前後<sup>3)</sup>と言われており、プレストレス導入時の所要強度を満足する確率を95%以上とするための配合強度は、約42N/mm<sup>2</sup>と算定される<sup>4)</sup>。図-2、図-3より、HPC単味およびBFS6混和の水結合材比35%はプレストレス導入強度を十分に満足できる。一方、BFS6混和の水結合材比40%およびBFS4混和の水結合材比35%では、40N

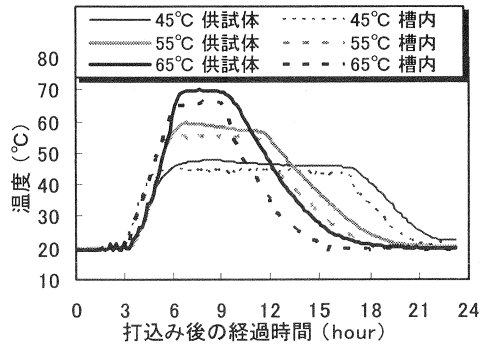


図-1 蒸気養生槽内の温度と供試体温度

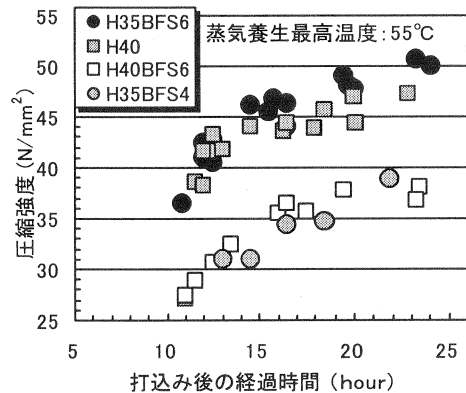


図-2 圧縮強度の経時変化 (配合の影響)

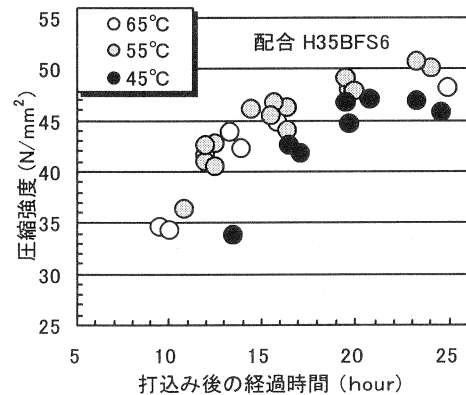


図-3 圧縮強度の経時変化 (蒸気養生条件の影響)

/mm<sup>2</sup>にも達していない。従って、所要の配合強度を得るためには、保持温度の上昇や保持時間の延長が必要である。しかし、蒸気養生したコンクリートは、徐々に温度を下げてから脱型する必要があり、保持温度を高めた場合には降温に要する時間も長くなる。よって、これらの配合にて蒸気養生温度を高めても、必ずしもプレストレス導入時期を早めることには繋がらないと考えられる。

図-4に積算温度と圧縮強度の関係を示す。両者の関係については、積算温度を対数とすると一般に750~1000°C・hの範囲では直線関係があり、1000°C・h以上では強度増加の割合が低下するとされている<sup>5)</sup>。本実験でも800~1000°C・hの範囲で直線関係がみられたが、その関係は温度パターンごとに異なり、強度増加の割合が変化する点も異なった。既往の研究<sup>6)</sup>によると、BFS6を普通ポルトランドセメントに混和した場合、圧縮強度は保持温度の影響を受けやすく、温度75°Cまでの範囲では、積算温度が同じであっても保持温度が高いほど強度も増大することが報告されている。HPCにBFS6を混和した本実験では、保持温度45°Cのパターンよりも保持温度55°Cおよび65°Cの方が強度は高かったが、55°Cと65°Cには差が認められなかった。

### 3. 2 材齢 28 日の圧縮強度

#### (1) 脱型時強度と材齢 28 日の圧縮強度の関係

図-5に蒸気養生したコンクリートの蒸気養生終了時の圧縮強度と材齢 28 日における圧縮強度の関係を示す。材齢 28 日の圧縮強度は、脱型後、温度 20°C、湿度 60%の恒温恒湿室に静置した供試体のものである。保持温度 55°Cの温度パターンについては、脱型時の圧縮強度が大きいほど材齢 28 日の圧縮強度が多少大きくなる傾向を示したが、BFS6を混和した影響は認められなかった。また、保持温度を 45°C、65°Cとした場合においてはデータ数も少なく、蒸気養生温度の 패턴の違いによる明確な傾向は認められなかった。しかし、脱型時における圧縮強度の差は材齢の経過により小さくなる傾向が認められ、設計基準強度 49N/mm<sup>2</sup>を十分に満足することが確認された。

#### (2) 脱型後の養生条件の影響

図-6に脱型後、様々な環境に移設した供試体の材齢 28 日の圧縮強度を示す。脱型後、材齢 28 日まで温度 20°C、湿度 60%の恒温恒湿室に静置した場合、BFS6混和の圧縮強度は、同一水結合材比 40%と比較するとHPC単味には及ばないが、水結合材比を5%小さくした場合においては同一の強度に達している。また、脱型時間の違いにおける大きな差は認められなかった。

脱型後、材齢 28 日まで屋外に曝露した場合、およ

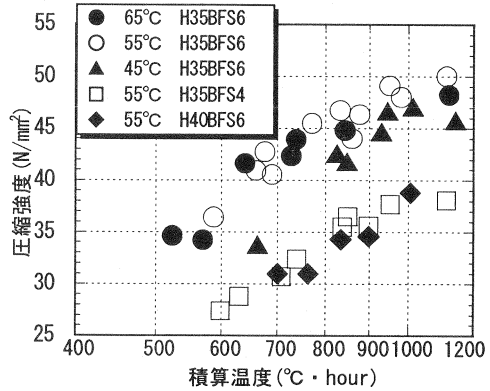


図-4 積算温度と圧縮強度の関係

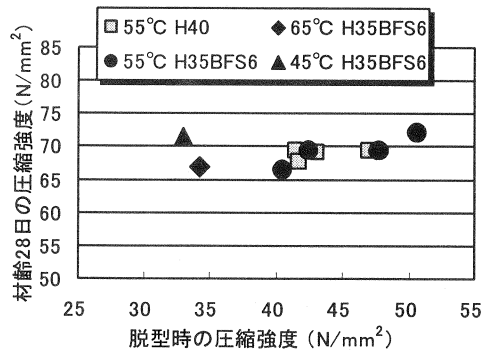


図-5 蒸気養生終了時および材齢 28 日の圧縮強度の関係

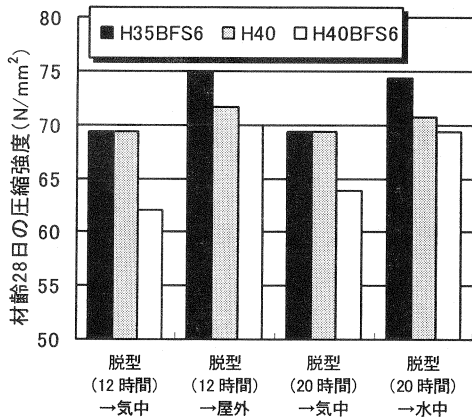


図-6 材齢 28 日の圧縮強度

び水中養生を行った場合は、いずれも恒温恒湿室に静置した場合に比べて、全体的に圧縮強度の増加傾向が認められる。また、HPC 単味に比べて BFS6 混和の方が強度の増加割合が大きく、HPC 単味と同一の水結合材比で比較しても、HPC 単味と同等の強度を示しており、BFS6 を混和した場合には、脱型後の湿潤養生や降雨などによる水の供給が強度増進に大きな影響を与えることが確認された。

(3) 水中養生期間の影響

図-7は水セメント比40%でHPC単味の供試体を、脱型後、恒温恒湿室に移した場合における28日圧縮強度を基準強度とし、基準強度に対するBFS6混和の強度比を示したものである。図は試験時期の異なる供試体の試験結果をまとめたものであり、ばらつきはあるものの、脱型後の水中養生期間が長いほど圧縮強度比が増加する傾向が認められる。水結合材比35%のBFS6混和は脱型後に水中養生を行わない場合においても基準とする圧縮強度と同等であるが、より確実に十分な強度を確保するためには脱型後の湿潤養生を行うことが必要である。また、水結合材比40%のBFS6混和は水中養生を施すことにより圧縮強度比の増加は認められるものの、材齢28日において基準強度と同等の強度を満足することは難しいものと考えられる。

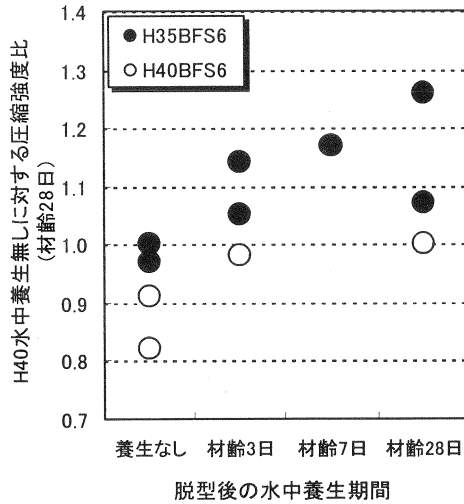


図-7 HPC 単味 (水中養生無し) に対する BFS6 混和の圧縮強度比

4. 結論

本試験で高炉スラグ微粉末 6000 を混和した高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす蒸気養生条件および脱型後の湿潤養生期間の影響を検討した結果、得られた知見は以下の通りである。

- (1) 蒸気養生したコンクリートの打込み終了から 10 時間～24 時間の圧縮強度を調べた結果、水結合材比 35%の高炉スラグ微粉末 6000 を混和したコンクリートは、水セメント比 40%の早強ポルトランドセメントのみを使用したコンクリートと同等の強度発現性を示し、プレストレス導入時の所要強度である 35N/mm<sup>2</sup> を十分満足できることが示された。
- (2) 蒸気養生条件の違いによって蒸気養生終了時の圧縮強度が変化しても、本実験の養生条件の範囲では、材齢 28 日における圧縮強度の差は小さくなる傾向を示した。
- (3) 材齢 28 日の圧縮強度について、水結合材比 40%では高炉スラグ微粉末 6000 を混和した方が無混和に比べて低いが、水結合材比を 5%小さくした場合は同等の圧縮強度を示した。また、より確実に十分な強度を確保するためには湿潤養生を行うことが必要である。

参考文献

- 1) 日本材料学会, 高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストレストコンクリート構造物の開発, 1998
- 2) 近田孝夫, 檀康弘, 堀健治, 長尾之彦; 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐海水性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.263-268, 1992
- 3) 小林一輔; 最新コンクリート工学 第5版, 森北出版, pp.122-124, 2002.4
- 4) 土木学会, コンクリート標準示方書 [施工編], pp.77-78, 2002
- 5) 河野清, 新舎博, 荒木謙一; 蒸気養生のマチュリチーと圧縮強度との関係について, セメント技術年報, Vol.27, pp.274-277, 1974
- 6) 檀康弘, 近田孝夫, 永浜一孝; 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの蒸気養生特性, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.222-227, 1991