

## 高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用したモルタルに関する基礎研究

(株)安部日鋼工業 正会員 工修 ○辛 軍青  
愛知工業大学 正会員 工博 吳 承寧

Abstract : This study is to verify the applicability by the combination of ground granulated blast furnace slag (BFS) and fly ash (FA) with high-early-strength Portland cement to the pre-stressed concrete structure. This paper is a report of basic experiments to investigate the effect of different types and amounts of admixtures on the strength and denseness of mortar. As the results of the experiments, it is clear that using the combination of BFS and FA, or using finer BFS can improve the strength of the concrete, and the peak of pore diameter and the porosity of the paste in the mortar can be decreased when using these admixtures especially BFS.

Key words : Blast furnace slag, Fly ash, Strength property, Pore size distribution

### 1. はじめに

高炉スラグ微粉末やフライアッシュなど産業副産物・廃棄物由来のコンクリート混和材は、資源の有効利用や、CO<sub>2</sub>排出量の削減およびコンクリート構造物の耐久性向上の観点から、今後は更なる利用促進が期待されている。

高炉スラグ微粉末は高炉で銑鉄を作る際に発生する副産物であり、従来から高炉セメントやコンクリート混和材として広く使われている。フライアッシュは石炭を燃焼させた時に発生する石炭灰のうち、電気集じん器により捕集された微粉末である。近年の電力事情の変化によって全国の石炭火力発電所の稼働率が上がり、産業廃棄物の「地産地消」の観点から見ても、フライアッシュの使用量や使用方法にはこだわらずに利用拡大が求められている。

コンクリートに高炉スラグ微粉末やフライアッシュをそれぞれ使用することに関する研究は国内外で行われている。しかし、これらの混和材を併用した場合、とくに早強ポルトランドセメントを使用するPC構造物に適用される場合は、コンクリートの強度特性などの基本性状は必ずしも明確に示されておらず、利用上の課題となっている。本研究は、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した高強度と高耐久性を有するPC構造物への適用性を検証している。本文は、上記内容中の基礎研究として、モルタルの強度特性、細孔径分布特性を実験的に検討し、混和材の種類や添加量が強度特性、ならびに組織の緻密性に及ぼす影響を報告したものである。

### 2. 検討方針

本研究では、水結合材比W/B=50%、40%、30%のモルタル配合を使用した。W/B=50%と40%配合の場合は現場打ちのRC構造物やポストテンション方式PC構造物を想定し、W/B=30%配合は工場製品のプレテンション方式PC部材を想定した。

高炉スラグ微粉末の添加方法はセメントの50%置換とする。これはPC橋梁上部工に過去の実績が多く耐久性が確認された配合<sup>1)</sup>であるが、本研究では高炉スラグ微粉末の粉末度（比表面積4000、6000、8000）の影響を改めて比較検討した。

フライアッシュの添加方法としては、初期強度の低下を避けるため細骨材の一部と置換するいわゆる「外割添加」の配合を主に使用し、上記の高炉スラグ微粉末の一部を置き換えるいわゆる「内割添

表-1 各シリーズのモルタル配合のイメージ

C(100%)	W	C		S
C(50%) +BFS(50%)	W	C	BFS	S
C(100%)+F(外割10%)	W	C		F S
C(50%) +BFS(50%) +F(外割10%)	W	C	BFS	F S
C(50%) +BFS(40%) +F(内割10%)	W	C	BFS	F S

【略号】 W:水(混和剤を含む) C:セメント BFS:高炉スラグ微粉末 F:フライアッシュ S:細骨材

表-2 使用材料

主な使用材料	種類	記号	特性値
セメント	早強ポルトランドセメント	H	密度3.14g/cm <sup>3</sup> 、比表面積4,380cm <sup>2</sup> /g
混和材	高炉スラグ微粉末4000	B4	密度2.88g/cm <sup>3</sup> 、比表面積4,060cm <sup>2</sup> /g
	高炉スラグ微粉末6000	B6	密度2.88g/cm <sup>3</sup> 、比表面積6,290cm <sup>2</sup> /g
	高炉スラグ微粉末8000	B8	密度2.91g/cm <sup>3</sup> 、比表面積7,920cm <sup>2</sup> /g
	フライアッシュ(Ⅱ種)	F3	SiO <sub>2</sub> 57.8%、比表面積3,550cm <sup>2</sup> /g
		F4	SiO <sub>2</sub> 53.7%、比表面積4,550cm <sup>2</sup> /g
骨材	岐阜県揖斐川産川砂	S	表乾密度2.30g/cm <sup>3</sup> 、吸水率1.29%

表-3 モルタルの配合表

水結合材比 (W/B%)	記号	水 (W)	セメント (C)	高炉スラグ微粉末 (BFS)			フライアッシュ (F)		細骨材 (S)
			H	B4	B6	B8	F3	F4	
50%	H	253	506						1518
	H+B6	252	252		252				1512
	H+F3	235	470				47		1551
	H+B4F3	233	234	234			47		1545
	H+B6F3	233	234		234		47		1545
	H+B8F3	233	234			234	47		1545
	H+B6F4	233	234		234			47	1545
40%	H	213	533						1599
	H+B6	212	265		265				1590
	H+F3	197	493				49		1626
	H+B4F3	196	245	245			49		1617
	H+B6F3	196	245		245		49		1617
	H+B8F3	196	245			245	49		1617
	H+B6F4	196	245		245			49	1617
30%	H	216	720						1440
	H+B6	214	357		357				1428
	H+F3	199	663				66		1458
	H+B4F3	197	328	328			66		1444
	H+B6F3	197	328		328		66		1444
	H+B8F3	197	328			328	66		1444
	H+B6F4	197	328		328			66	1444
	H+B6F3内	213	355		284		71		1420

加」の配合も比較対象として使用した。また、フライアッシュの添加率が低いほど、フライアッシュ中の未燃カーボンはコンクリートの空気量に及ぼす影響が小さいことから、添加量をセメントの10%に設定した。なお、本研究では産地や粉末度が異なる2種類のフライアッシュ(Ⅱ種)を使用した。

本研究で実施した試験シリーズ、および各シリーズのモルタル配合のイメージを表-1に示す。

### 3. 試験概要

#### 3.1 使用材料と配合

本研究の使用材料の詳細を表-2に示す。強度などの硬化後特性、耐久性特性を検討する試験はモルタル供試体を使用し、細孔径量分布などの材料分析はセメントペースト供試体を使用した。

モルタル供試体の配合を表-3に示す。結合材と骨材の比率において、W/B=50%と40%の配合は結合材B:骨材S=1:3とし、W/B=30%の配合は結合材B:骨材S=1:2とした条件で単位量を計算した。

### 3.2 試験方法

#### (1) 試験体製作

モルタルまたはセメントペーストは、モルタルミキサーで練混ぜを行い、それぞれφ50mm×H100mmの円柱供試体を作成した。

W/B=50%と40%の配合の供試体は、現場打ちのRC構造物やポストテンション方式PC構造物を想定し、1日の20℃封緘養生後に翌日脱枠した。

また、W/B=30%の配合は工場製品のプレテンション方式PC部材を想定し、早期強度を得るために養生槽で最高温度50℃の給熱促進養生を行った。養生温度パターンは、前置き25℃を3時間、温度上昇と降下を各2時間、最高温度50℃保持を6時間に、計13時間と設定し、養生期間中の相対湿度を常に飽和状態になるようにプログラムした。

いずれのケースにおいても、翌日脱枠後に所定の材齢まで恒温室で20℃の水中養生を実施した。

#### (2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験はモルタルの円柱供試体を使用し、JIS A 1108 に準拠して行った。試験材齢は1日、3日、7日、28日、91日(13週)、168日(24週)とした。

#### (3) 細孔径量分布試験

細孔径分布の測定試料は、材齢168日以降のセメントペースト円柱供試体内部からサンプルを取出し、直径2.5mm~5.0mmの粒状に粉砕し、アセトンで水和停止した後に40℃乾燥したものを使用した。水銀圧入法による細孔径分布測定は、Auto-poreIV 9500にて最大圧力228MPaまで測定した。

## 4. 試験結果

### 4.1 圧縮強度の試験結果および考察

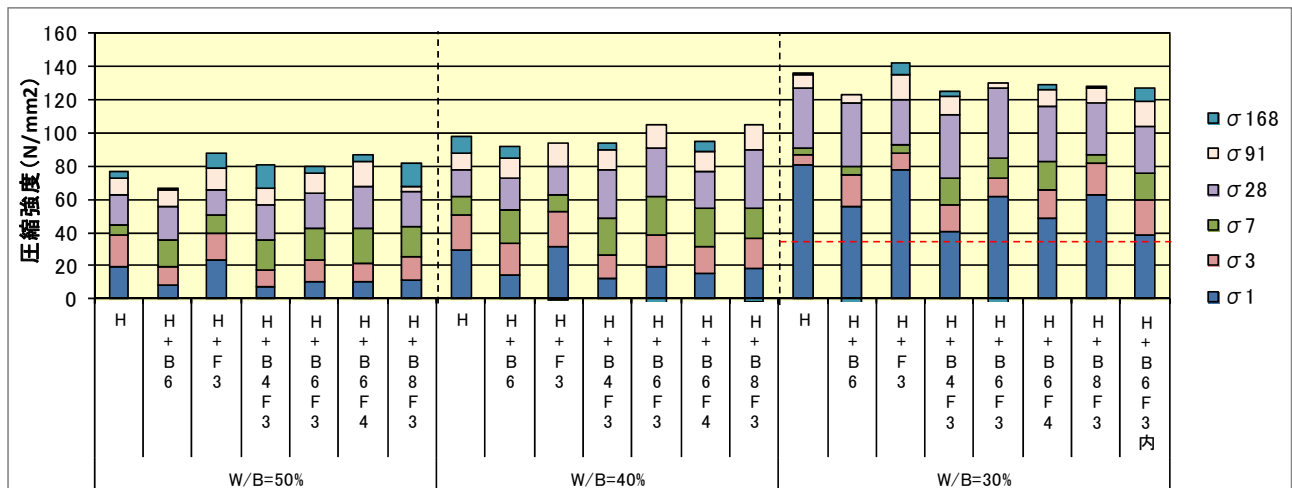


図-1 全配合の圧縮強度の試験結果

全配合の圧縮強度の試験結果を図-1に示す。ここで、工場製品を想定した水結合材比W/B=30%の各配合では、材齢1日強度はいずれもプレストレス導入目標強度35N/mm<sup>2</sup>を満足している。

早強ポルトランドセメント単味(H)を使用したモルタルは、W/B=50%、40%、30%の順に、材齢28日強度が62.7N/mm<sup>2</sup>、77.4N/mm<sup>2</sup>、126.9N/mm<sup>2</sup>であった。以下に、各種パラメータが圧縮強度に及ぼす影響を「圧縮強度比」を用いて比較検討を行った。ここで使用した「圧縮強度比」は、各水結合材比W/Bにおいて、早強単味(H)配合を使用したモルタルの材齢28日強度を1.0とした時の比率である。

(1) 混和材種別の影響

図-2に、水結合材比W/Bごとに、早強ポルトランドセメント単味、混和材として高炉スラグ微粉末とフライアッシュを単独に添加または併用した配合の圧縮強度試験結果を示す。

W/Bが同じの材齢1日、3日の初期強度を比較すると、高炉スラグ微粉末が50%置換された場合 (H+B6, H+B6F3) の圧縮強度は、早強単味 (H) とフライアッシュのみ添加 (H+F) の配合より強度が30~50%低下した。しかし、材齢7日以降に、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した配合 (H+B6F3) の強度増加が加速する傾向が見られ、とくに標準養生を行ったW/B=50%, 40%の配合ではその傾向は顕著であった。

一般に、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートにおいては、初期・長期強度不足に対して単位結合材量を増やしW/Bを小さく設定する対策がある。上記の試験結果から、フライアッシュの外割添加は見かけのW/Bを変更せずに、材齢7日以降のコンクリート中長期強度を向上することが示された。

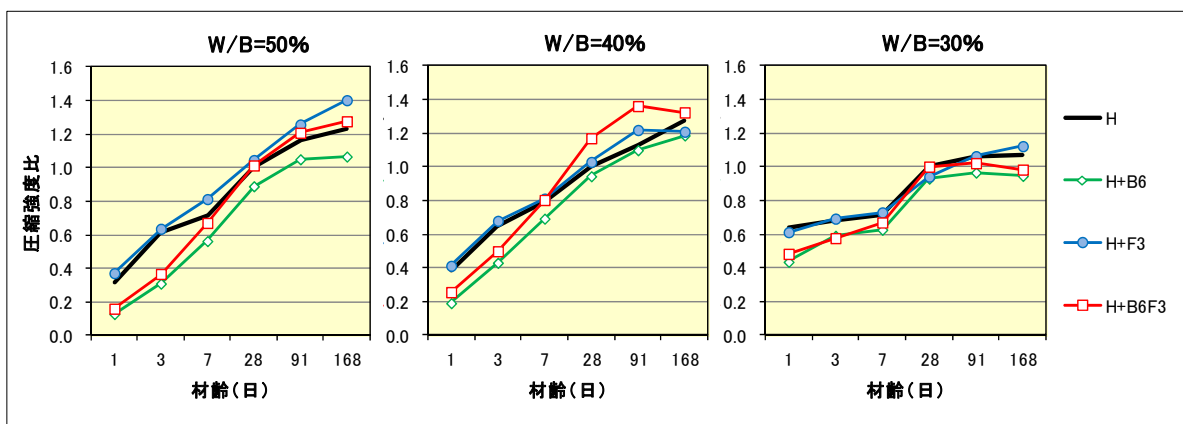


図-2 各種の混和材を使用した場合の圧縮強度

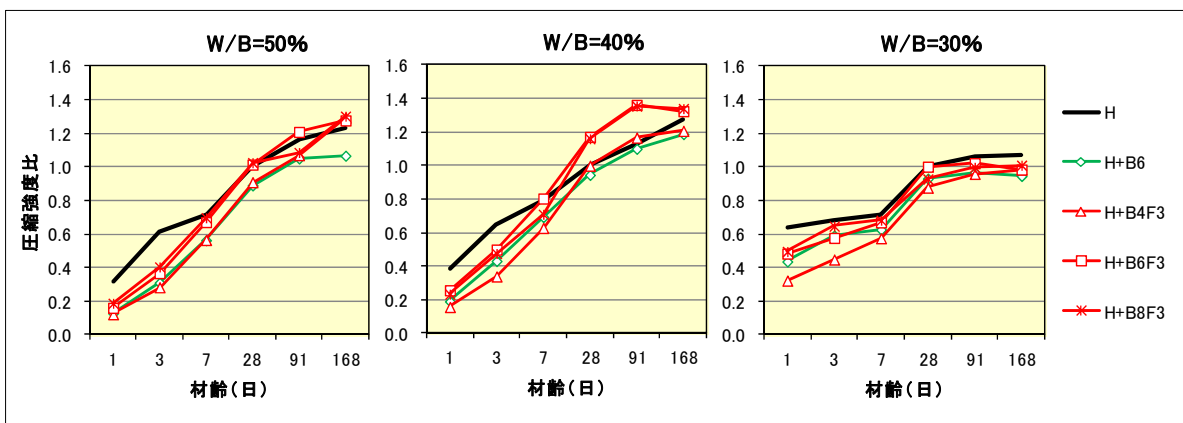


図-3 各種の高炉スラグ微粉末を使用した場合の圧縮強度

(2) 高炉スラグ微粉末の粉末度の影響

図-3に、早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末 (比表面積4000, 6000, 8000) に置換し、更にフライアッシュを10%外割添加した配合の圧縮強度試験結果を示す。比較として、フライアッシュ無添加の高炉スラグ微粉末6000を使用した結果 (H+B6) も表示する。

初期材齢において、高炉スラグ微粉末6000や8000を使用した配合 (H+B6F3, H+B8F3) は、高炉スラグ微粉末4000 (H+B4F3) を使用した配合より初期強度が増加しており、とくに給熱促進養生を実施したW/B=30%の場合ではこの傾向は顕著であった。ただし、高炉スラグ微粉末6000と8000を使用した配合の結果を比較すると、初期強度の大きな差異が確認されなかった。

一方、長期材齢において、各種の高炉スラグ微粉末を使用した配合は圧縮強度が同程度であり、高炉スラグ微粉末の粉末度は長期強度発現に及ばず影響が小さいと考えられる。

また、W/B=50%の配合に限り、高炉スラグ微粉末4000とフライアッシュを併用する配合(H+B4F3)は、高炉スラグ微粉末6000を単独に使用した配合(H+B6)と同じ強度発現履歴を示した。

したがって、コンクリートの初期強度の向上を図りたい場合、高炉スラグ微粉末4000とフライアッシュの併用、活性度が高い高炉スラグ微粉末6000と8000の使用は有効な方法である。その中、高炉スラグ微粉末8000の国内生産量、流通や価格などの要因を考慮すると、高炉スラグ微粉末6000を使用することが望ましいと考えられる。

(3) フライアッシュの種類・粉末度の影響

本研究では、表-2に示す粉末度が異なる2種類のフライアッシュを使用した。フライアッシュ比表面積3,550cm<sup>2</sup>/gの配合(H+B6F3)と比表面積4,550cm<sup>2</sup>/gの配合(H+B6F4)の圧縮強度を比較すると、図-4に示した各配合において、粉末度に対応した強度発現の大きな差異が見られなかった。本研究において、フライアッシュの添加量(10%)が比較的少ないため、粉末度の強度への影響が明確に現れていないと推測されるが、今後の研究において留意したいと思われる。

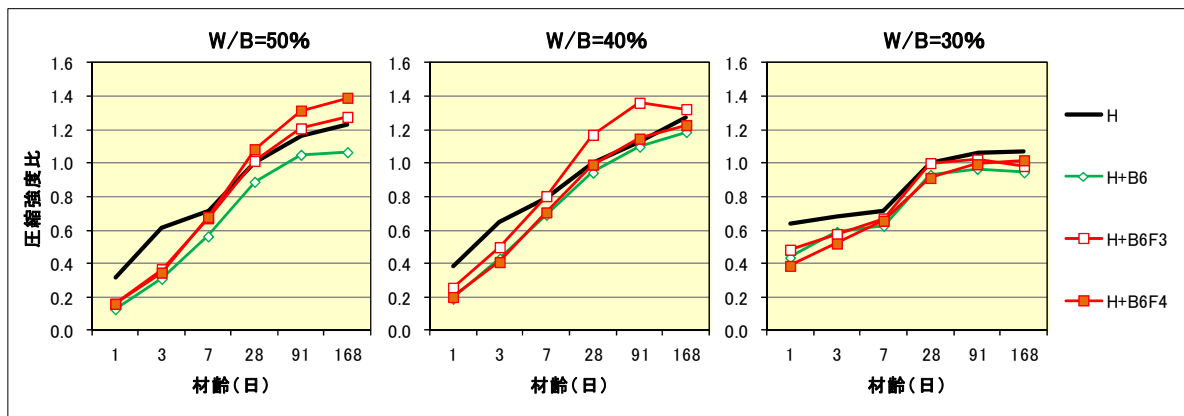


図-4 各種のフライアッシュを使用した場合の圧縮強度

(4) フライアッシュの外割添加と内割添加の比較

水結合材比W/B=30%、高炉スラグ微粉末6000を50%置換したケースの中、フライアッシュ未添加(H+B6)、10%外割添加(H+B6F3)と10%内割添加(H+B6F3内)の圧縮強度試験結果を図-5に示す。

初期材齢では、内割添加した場合(H+B6F3内)は未添加(H+B6)より圧縮強度が約20%低下したが、外割添加した場合は強度の低下が見られなかった。これはフライアッシュのポズラン反応が緩やかに発生すること、外割添加した場合はモルタルの実質のW/Bが若干低減されることに関連すると考えられる。一方、長期材齢ではフライアッシュのポズラン反応により強度が増加し、各ケースでは未添加の場合と同等以上の強度になった。

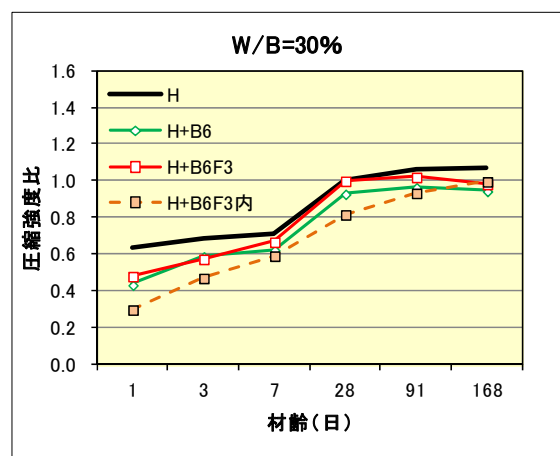


図-5 フライアッシュを外割添加と内割添加した場合の圧縮強度

#### 4.2 細孔径分布の試験結果および考察

図-6に、水結合材比W/B=50%を代表にして、早強ポルトランドセメント単味、混和材として高炉スラグ微粉末とフライアッシュを単独に添加または併用した配合の細孔径分布の試験結果を示す。

細孔径0.005~0.1 $\mu$ mの範囲では、混和材を使用した各配合は早強単味配合(H)より、細孔径のピークおよび細孔容積の両方が小さい側にシフトしている。とくに高炉スラグ微粉末の単独使用(H+B6)、フライアッシュ併用(H+B6F3)の配合はその傾向が最も顕著であり、混和材使用による組織の緻密化を表している。

本研究では塩分浸透量、ASR抵抗性などの耐久性試験も実施中である。今後、各配合の細孔径分布と耐久性の関連性を究明し、コンクリートの強度および耐久性の両方から材料評価を行う予定である。

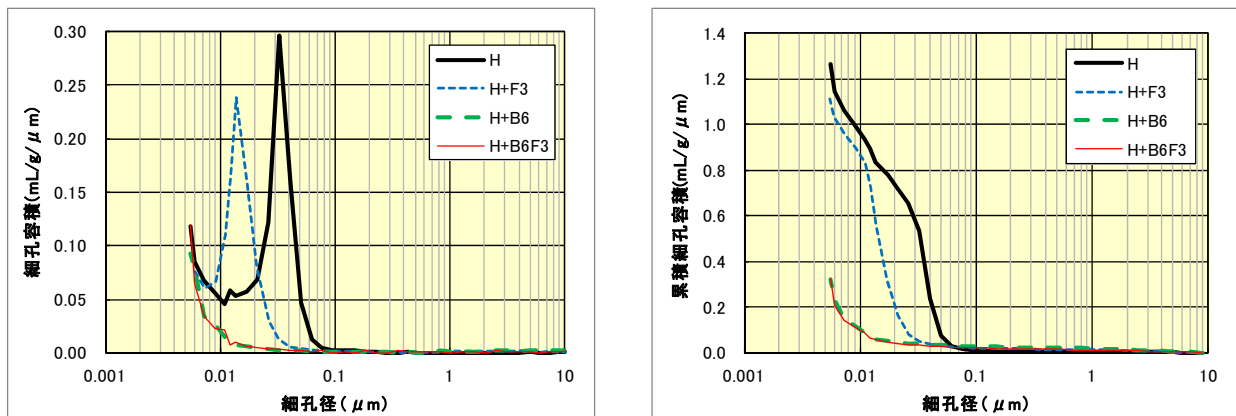


図-6 W/B=50%の水銀圧入法による細孔径分布 (左: 微分細孔容積, 右: 累積細孔容積)

#### 5. まとめ

今回の実験検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) 高炉スラグ微粉末が50%置換された場合はモルタルの初期強度が低下するが、フライアッシュの外割併用により材齢7日以降に強度増加が加速する。
- (2) 高炉スラグ微粉末4000とフライアッシュの併用、高炉スラグ微粉末6000と8000の使用はコンクリート強度を向上させる効果がある。
- (3) フライアッシュ粉末度がモルタルの強度発現に及ぼす影響は、フライアッシュの添加量10%の場合、その強度発現の差異が見られなかった。また、フライアッシュの外割添加では圧縮強度の低下が発生しないが、内割添加では初期強度が低下した。
- (4) 混和材を使用した場合、コンクリート中のセメントペーストの細孔径のピークおよび細孔容積が小さい側にシフトし、とくに高炉スラグ微粉末を使用した配合は緻密性が優れる。

【謝辞】本研究の実験の遂行にあたり、愛知工業大学卒業生の竹内友之氏、野口耕佑氏にご協力いただきました。ここで感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 松山高広, 石井豪: 高性能コンクリートを用いたP C構造物の耐久性向上技術—高炉スラグ微粉末の適用例—, プレストレストコンクリート, Vol. 52, No. 2, Mar. 2010