

# フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いた 環境負荷低減コンクリートの基本性能

松家武樹<sup>\*1</sup>・福留和人<sup>\*1</sup>・坂本 守<sup>\*2</sup>・斉藤栄一<sup>\*2</sup>・鈴木康範<sup>\*3</sup>・堺 孝司<sup>\*4</sup>

本研究は、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の利用がコンクリートのフレッシュ性状および硬化特性に及ぼす影響と環境負荷低減効果について明らかにすることとした。その結果、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の併用は、混和材無混入と比べて初期強度を低下させるが、材齢 28 日のコンクリートの強度およびフレッシュ性状ならびに収縮特性は同等程度の性能であること、および 1N/mm<sup>2</sup> あたりの圧縮強度を得るために排出される CO<sub>2</sub> 等環境負荷物質量を減少させることが明らかとなった。

キーワード：フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、環境負荷物質量排出量、フレッシュ性状、硬化特性

## 1. はじめに

近年、世界レベルおよび日本レベルで温室効果ガスの削減目標が設定され、あらゆる分野で環境に対する配慮が益々その重要性を増している。削減目標に対してあらゆる産業が低炭素技術開発に向けて活発に取り組んでいる中、建設セクター・コンクリートセクターだけがその外で従来の価値観で活動を続けることができないことは明らかである。建設セクター・コンクリートセクターは、これまで要求されてきた材料性能および力学性能に加え、環境性能も性能評価の一つのインデックスとして考慮することが求められている。

従来のコンクリートでは、高強度・高耐久性コンクリートが究極の目標とされてきた。しかし、コンクリートは極めて大きな環境負荷を発生させる。したがって、今後は、新たなコンクリートを開発していく上で、従来の高強度、高耐久性に加えて、「低環境負荷性」が新性能として要求される。

コンクリートの材料の中で最も CO<sub>2</sub> 等環境負荷物質量を排出する材料はセメントである。単位コンクリートあたりのセメント量を減らすことが CO<sub>2</sub> 等を削減させる 1 つの有効な手段である。その代表的な例が、高炉スラグ微粉末（以下、高炉スラグと略記）およびフライアッシュをセメントに混合させた高炉セメントおよびフライアッシュセメントなどの従来の混合セメントである。

これまで高炉セメントやフライアッシュセメントを用いたコンクリートに関する研究は数多く報告されているが、従来の混和材の利用は、主に産業副産物の有効利用のコンセプトの下で用いられており、「力学・耐久性」と「環境性能」との最適化を目指したものではない。さらに、我が国における産業廃棄物処理を担う静脈産業

としてのセメント産業の位置づけや混和材が多い場合のコンクリートの性能を考慮すると、比較的少ない混和材を置換したセメントを汎用的に用いることによって CO<sub>2</sub> 等を全体として削減させることが現実的と考えられる。しかし、比較的少ない置換率の高炉スラグおよびフライアッシュを併用した三成分系セメントを用いたコンクリートに関する研究は少なく、今後、様々なケースについてのコンクリートの基本性能と環境性能を総合的に評価することが重要となる。

そこで本研究では、フライアッシュおよび高炉スラグの組合せによるコンクリートの「基本性能」と「環境性能」の最適化を図るための基礎的な情報を得るために、フライアッシュおよび高炉スラグの組み合わせによる置換率がコンクリートのフレッシュ性状および硬化特性に及ぼす影響と混和材利用に伴う環境負荷低減効果について明らかにすることとした。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

表 1 に、本研究で使用したコンクリートの材料の種類および品質を示す。

### 2.2 コンクリートの製造および配合

コンクリートの製造は、温度 20℃ の試験室で行い、容量 100 リットルの強制二軸ミキサを用いて、1 バッチの練混ぜ量を 60 リットルとして行った。練混ぜは、最初にセメント、フライアッシュ、高炉スラグ、細骨材、粗骨材を 15 秒間空練りし、次に水と混和剤を加えて 90 秒間行った。

コンクリートの配合は水結合材比（以下、W/B と略

\*1 技術研究所 \*2 環境部 \*3 住友大阪セメント株式会社 \*4 香川大学

表-1 材料の種類および品質

材料	種類	記号	品質
セメント	普通 ポルトランドセメント	C	密度: 3.15g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3430cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ	フライアッシュ II種	FA	密度: 2.25g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 4150cm <sup>2</sup> /g
高炉スラグ 微粉末	高炉スラグ微粉末 4000	BS	密度: 2.89g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 4170cm <sup>2</sup> /g
細骨材	川砂	S	密度: 2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 1.12%, 粗粒率: 2.91, 微粒分量: 2.40%, 実積率: 69.5%
粗骨材	碎石	G1	最大寸法: 20mm, 密度: 2.72g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.58%, 粗粒率: 7.07, 実積率: 58.7%
		G2	最大寸法: 15mm, 密度: 2.71g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.77%, 粗粒率: 5.98, 実積率: 59.4%
混和剤	高性能AE減水剤	-	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	AE剤	-	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

記)を40%, 細骨材率(以下 s/a と略記)46%, 高性能AE減水剤の量を結合材に0.8%を乗じる量の一定とした。フライアッシュおよび高炉スラグはセメントの質量置換で, フライアッシュの置換率を0, 10, 20%, 高炉スラグの置換率を0, 10, 20, 30, 40%とし, これらを組合せ13ケースとした。表-2に, 混和材置換率の組合せを示す。なお, 配合は所定のフレッシュ性状が得られるように単位水量およびAE剤の添加量を調整して決定した。表-3に, コンクリートの配合を示す。

### 2.3 試験項目

フレッシュコンクリートでは, スランブ試験(JIS A 1101), 空気量試験(JIS A 1128), ブリーディング試験(JIS A 1123)および凝結試験(JIS A 1147)を行った。なお, 本実験では目標スランブを12.0±2.5cm, 目標空気量を4.5±1.0%とした。

硬化コンクリートでは, 圧縮強度試験(JIS A 1108), 割裂引張強度試験(JIS A 1113), 自己収縮試験<sup>1)</sup>および乾燥収縮試験(JIS A 1129)を行った。なお, 自己収縮ひずみの測定には, 低剛性タイプの埋込み型ひずみ計を使用し, 実測ひずみから温度ひずみ(熱膨張係数10μ/°C)を差し引いた値を自己収縮ひずみとした。また,

表-2 混和材置換率の組合せ

		BS置換率(%)				
		0	10	20	30	40
FA置換率(%)	0	○	○	○	○	○
	10	○	○	○	○	—
	20	○	○	○	○	—

自己収縮の測定開始はコンクリートの始発時間とした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 フレッシュコンクリート

##### (1) 単位水量

図-1に, 各配合における単位水量を示す。同図の括弧内にはスランブ値を示している。フライアッシュおよび高炉スラグ置換率の増加に伴い, 単位水量は減少している。これは, フライアッシュのボールベアリング効果と, フライアッシュおよび高炉スラグの比表面積がセメントの値よりも大きいことに起因して, 適正な粒度分布を構成したことが流動性に寄与したものと類推できる。なお, 既往の文献<sup>2)</sup>で報告されているが, セメント量の減少に伴うC<sub>3</sub>AおよびC<sub>4</sub>AFの間隙相量の減少が流動性の向上に寄与しているともいえる。

##### (2) AE剤添加量

図-2に, 各配合におけるAE剤添加量を示す。同図の括弧内には空気量を示している。フライアッシュ置換率増加に伴い, AE剤添加量は増加している。フライアッシュの混入は, その中に含まれる未燃焼炭素のAE剤への吸着により, AE剤の量を増加させる必要があることが知られている<sup>3)</sup>。一方, フライアッシュおよび高炉スラグを併用した場合, 高炉スラグ置換率の増加と共にAE剤添加量は減少する。これは, 今回の配合条件では単位コンクリートあたりのフライアッシュの量が減少していることに起因するものである。

表-3 コンクリートの配合

W/B (%)	フライアッシュ置換率 (%)	高炉スラグ置換率 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						高性能AE減水剤		AE剤(100倍希釈)		
				水 W	セメント C	フライアッシュ FA	高炉スラグ BS	細骨材		粗骨材	(C+FA+BS)×%	(kg/m <sup>3</sup> )	(C+FA+BS)×%	(kg/m <sup>3</sup> )
								川砂 S	碎石					
40	0	0	46	140	350	0	0	848	620	412	0.80	2.80	0.12	0.42
		10		138	311	0	35	851	623	414	0.80	2.77	0.12	0.42
		20		136	272	0	68	855	625	415	0.80	2.72	0.12	0.41
		30		135	238	0	102	853	624	415	0.80	2.72	0.12	0.41
		40		133	200	0	133	859	628	417	0.80	2.66	0.12	0.40
	10	0		135	304	34	0	854	624	415	0.80	2.70	0.25	0.85
		10		130	260	33	33	864	632	420	0.80	2.61	0.25	0.82
		20		128	224	32	64	867	634	421	0.80	2.56	0.25	0.80
		30		126	189	32	95	871	637	423	0.80	2.53	0.20	0.63
	20	0		131	262	66	0	858	627	417	0.80	2.62	0.40	1.31
		10		127	223	64	32	865	633	420	0.80	2.55	0.40	1.28
		20		124	186	62	62	871	637	423	0.80	2.48	0.40	1.24
30		121	152	61	91	877	641	426	0.80	2.43	0.35	1.06		

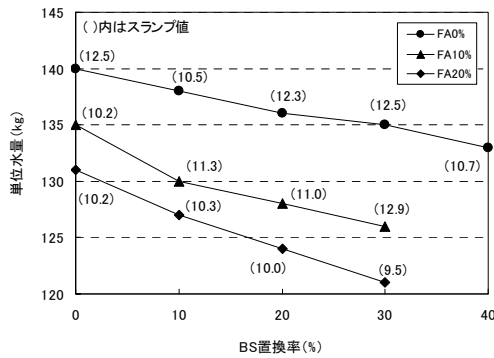


図-1 単位水量

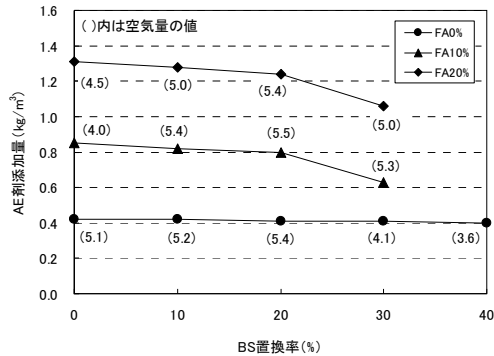


図-2 AE剤添加量

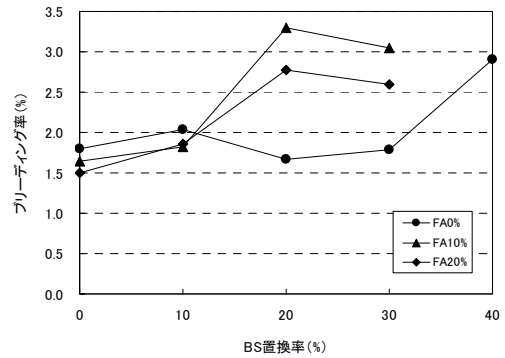


図-3 ブリーディング率

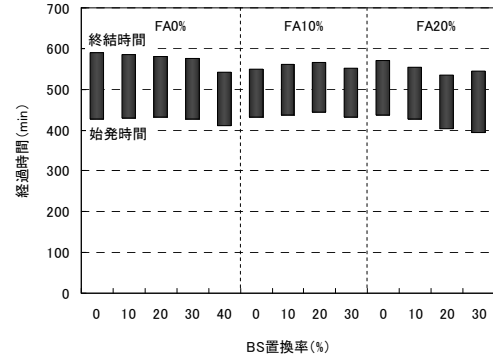


図-4 凝結時間

### (3) ブリーディング率

図-3に、ブリーディング率を示す。高炉セメントB種に相当するフライアッシュ無混入の高炉スラグ置換率40%と、フライアッシュ置換率10%および20%の高炉スラグ置換率20%および30%の場合に、ブリーディング率は2.5%を超える結果となっているが、他の配合におけるその量は2.0%程度以下であった。ブリーディングは、単位水量、単位粉体量、各結合材の水分吸着量などに支配されると考えられ、本実験はそれぞれの因子が複雑に絡み合った結果である。

### (4) 凝結時間

図-4に、凝結時間を示す。フライアッシュ置換率が0%および20%の場合、高炉スラグ置換率の増加に伴って、始発および終結時間が早くなる傾向がある。これは、高炉スラグ混入に伴う単位水量の減少が影響していると考えられる。しかしながら、フライアッシュ置換率が10%の場合、高炉スラグ置換率の増加に伴って、始発時間および終結時間が遅延している傾向にあるが、その差は、始発時間で最大11分、終結時間で17分であり、有意な差異はみられない。

全ての配合において、コンクリートの始発時間は、コンクリート打込み開始より395分から444分の範囲であり、終結時間は530分から590分の範囲である。なお、始発時間から終結時間までは118分から163分の範囲であった。

## 3.2 硬化コンクリート

### (1) 圧縮強度

図-5に、材齢3, 7, 28日におけるコンクリートの圧縮強度を示す。図-6には、材齢3日および28日のコンクリートの圧縮強度増減率を示す。同図は混和材無混入のコンクリートの圧縮強度を100とし、各配合におけるコンクリートの圧縮強度増減率を示している。

材齢3日におけるコンクリートの圧縮強度は、フライアッシュおよび高炉スラグ置換率の増加と共に減少していることがわかる。混和材無混入の場合に比べ、フライアッシュ置換率20%および高炉スラグ置換率0%における圧縮強度は26%低下しており、高炉スラグ置換率40%およびフライアッシュ置換率0%における圧縮強度は36%低下している。一方、フライアッシュ置換率20%および高炉スラグ置換率30%における圧縮強度低下率が最大であり、その低下率は54%である。材齢3日における混和材混入に伴う圧縮強度の低下は、単位セメント量の減少によるものである。なお、材齢3日におけるコンクリートの圧縮強度と単位セメント量の関係には相関関係がある。

一方、材齢28日における混和材混入に伴うコンクリートの圧縮強度の低下率は、材齢3日に比べ、小さくなっている。これは、フライアッシュによるボゾラン反応と、高炉スラグによる潜在水硬性によるものと考えられる。なお、フライアッシュ置換率20%および高炉スラグ置換率30%における圧縮強度は、混和材無混入の場合と比べ19%の低下である。

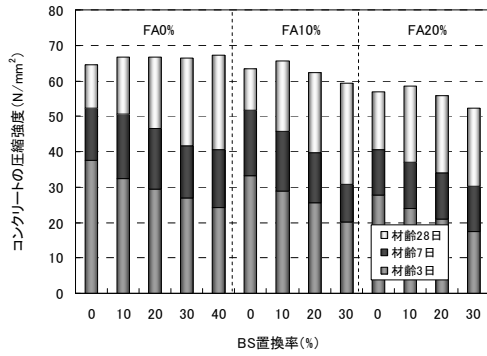


図-5 コンクリートの圧縮強度

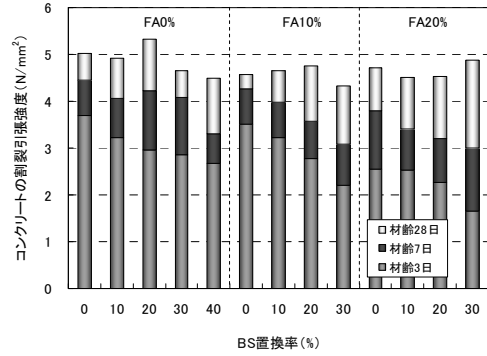


図-7 コンクリートの割裂引張強度

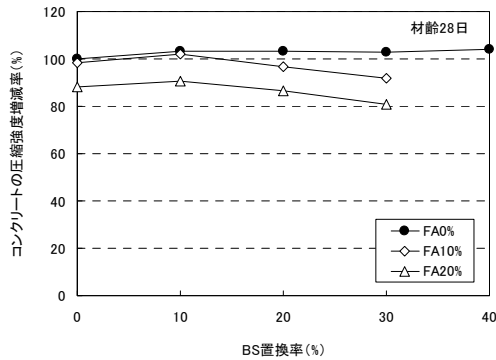
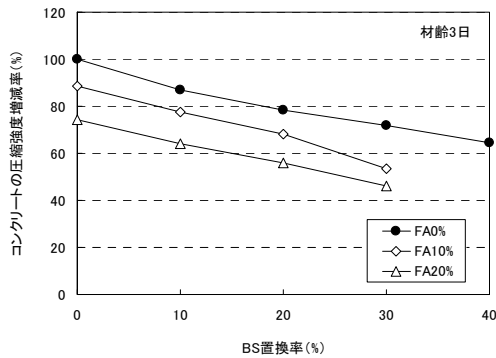


図-6 コンクリートの圧縮強度増減率

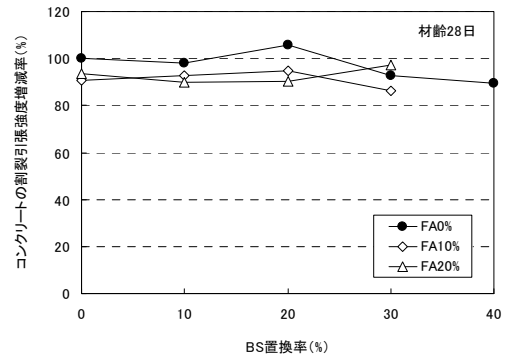
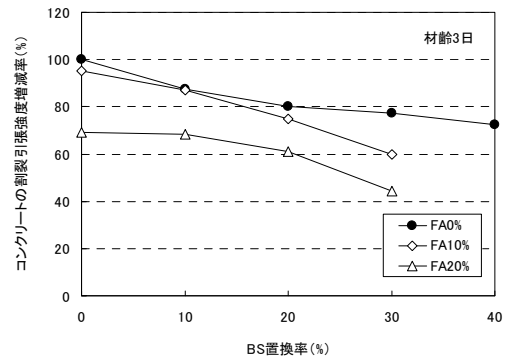


図-8 コンクリートの割裂引張強度増減率

(2) 割裂引張強度

図-7に、材齢 3, 7, 28 日におけるコンクリートの割裂引張強度を示す。図-8には、材齢 3 日および 28 日のコンクリートの割裂引張強度増減率を示す。同図は混和材無混入のコンクリートの割裂引張強度を 100 とし、各配合におけるコンクリートの割裂引張強度増減率を示している。コンクリートの割裂引張強度は前述したコンクリートの圧縮強度と同様の傾向を示している。材齢 3 日および 28 日におけるフライアッシュ置換率 20%および高炉スラグ置換率 30%のコンクリートの割裂引張強度は、混和材無混入の場合と比べ、55%および 3%の低下である。なお、本配合における材齢 28 日における割裂引張強度の最大低下率は 14%であり、その配合はフライアッシュ置換率 10%および高炉スラグ置換率 30%である。

(3) 自己収縮ひずみ

図-9に、経過日数 1, 3, 7, 28 日におけるコンクリ

ートの自己収縮ひずみを示す。フライアッシュの混入は、混和材無混入の場合に比してコンクリートの自己収縮ひずみ量を低減させるが、高炉スラグの混入が自己収縮ひずみ量に及ぼす影響は小さい。

(4) 乾燥収縮ひずみ

図-10に、経過日数 3, 7, 14, 28 日におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみを示す。フライアッシュ置換率 10%の場合、フライアッシュ 0%の場合に比べ、コンクリートの乾燥収縮ひずみ量を低減しているが、フライアッシュ置換率 20%の場合、コンクリートの乾燥収縮ひずみ量は低減していない。一方、高炉スラグ置換率の増加と共にコンクリートの乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向がある。これは、高炉スラグ混入に伴い単位水量を減少させたこと、および高炉スラグの潜在水硬性によりコンクリートの組織が密実化したためであると考えられる。

## 4. 混和材利用による環境評価

### 4.1 算出方法

本研究ではインベントリデータが整備されている CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> およびばいじん排出量を算出の対象としている。インベントリデータは、「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」<sup>4)</sup>より引用した。表-4に、コンクリートの製造に必要である材料の CO<sub>2</sub> 排出原単位を示す。AE 剤に関しては、使用量が少量であることから、対象から除外した。

### 4.2 環境負荷物質排出量

図-11～図-14に、各配合における CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, ばいじん排出量を示す。フライアッシュおよび高炉スラグの置換率増加に伴い、CO<sub>2</sub> 等の環境負荷物質排出量は減少している。本実験における各配合の CO<sub>2</sub> 排出量は 127kg/m<sup>3</sup> から 275kg/m<sup>3</sup>, SO<sub>x</sub> 排出量は 34g/m<sup>3</sup> から 56g/m<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub> 排出量は 247g/m<sup>3</sup> から 552g/m<sup>3</sup>, ばいじん排出量は 9g/m<sup>3</sup> から 16g/m<sup>3</sup> の範囲である。

図-15に、コンクリートの圧縮強度に対する CO<sub>2</sub> 排出量の比の一例を示す。ここに示す値は 1N/mm<sup>2</sup> のコンクリートの圧縮強度を得るために排出される CO<sub>2</sub> 量であり、その値が小さいほど、環境負荷の小さいコンクリートであることを意味している。材齢 3 日におけるコンクリートの圧縮強度に対する CO<sub>2</sub> 排出量の比は、大きな差異はなく、ほぼ同等であると判断できる。しかしながら、材齢が進むにつれ、混和材を混入することにより、その比は小さくなる傾向がある。特に材齢 28 日では、フライアッシュおよび高炉スラグ置換率の増加と共にその比は小さくなる。なお、SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, ばいじんについても同様の傾向である。このことはフライアッシュおよび高炉スラグを使用することにより、材齢の経過に伴い、混和材が持つ環境負荷低減効果を最大限に引き出すことができることを意味するものである。

## 5. まとめ

フライアッシュ置換率 20%および高炉スラグ置換率 40%までの範囲におけるフライアッシュおよび高炉スラグの併用による効果をまとめると以下の通りである。

- (1) 単位水量を著しく減少させるが、AE 剤の使用量を増大させる。
- (2) コンクリートのブリーディングに影響を及ぼすが、コンクリートの凝結時間に及ぼす影響は小さい。
- (3) 混和材無混入に比べ、材齢 3 日におけるコンクリートの圧縮強度および割裂引張強度を最大 54%お

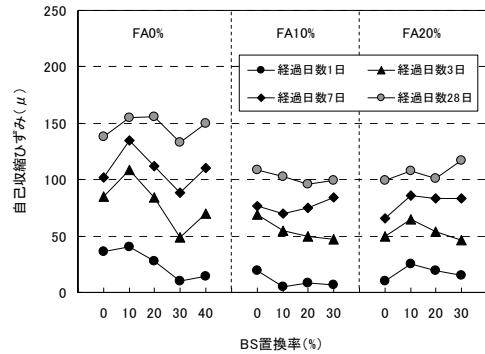


図-9 自己収縮ひずみ

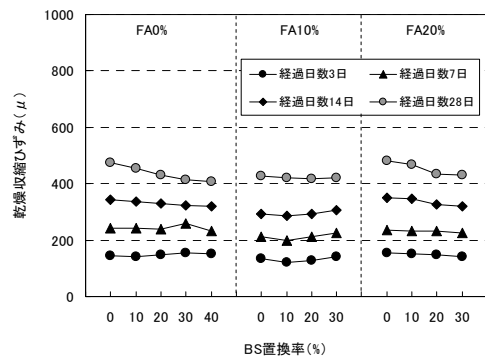


図-10 乾燥収縮ひずみ

表-4 CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, ばいじん排出原単位

材料名	CO <sub>2</sub> 排出原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /t)	SO <sub>x</sub> 排出原単位 (kg-SO <sub>x</sub> /t)	NO <sub>x</sub> 排出原単位 (kg-NO <sub>x</sub> /t)	ばいじん排出原単位 (kg-PM/t)
ポルトランドセメント	765.5	0.122	1.55	0.0358
フライアッシュ	17.9	0.0062	0.00754	0.00125
高炉スラグ微粉末	26.5	0.00836	0.0102	0.00169
細骨材	3.7	0.0086	0.00586	0.00199
粗骨材	2.9	0.00607	0.00415	0.00141
高性能AE減水剤	187.5	-	-	-

よび 55%低下させるが、材齢 28 日におけるそれぞれの低下率は最大 19%および 14%と小さくなる。

- (4) 混和材無混入に比べ、コンクリートの自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみを低減できる。
- (5) 混和材無混入に比べ、材齢 28 日における 1N/mm<sup>2</sup> あたりコンクリートの圧縮強度を得るために排出される CO<sub>2</sub> 等環境負荷物質量を小さくできる。

### 参考文献

- 1) 社団法人日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，1996。
- 2) 宮本欣明，山本康弘：高炉セメント B 種にフライアッシュを用いた高流動コンクリートの流動特性およびコンクリートの品質に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 577 号，pp.1-7，2004。
- 3) 町勉，荒島猛，上原匠，梅原秀哲：コンクリート材料としてのフライアッシュの適用限界に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.199-204，1997。

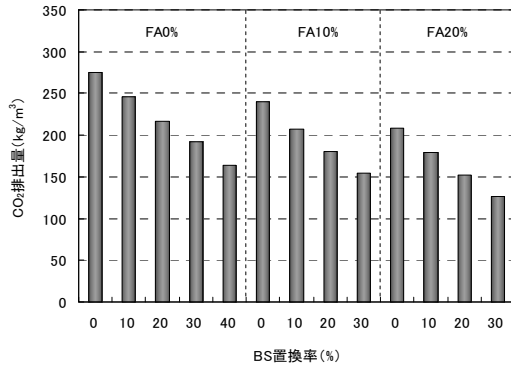


図-1 1 CO<sub>2</sub> 排出量

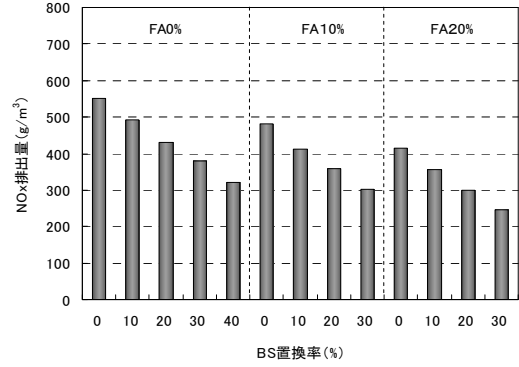


図-1 3 NO<sub>x</sub> 排出量

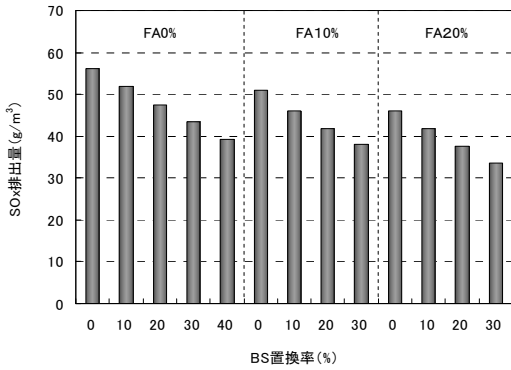


図-1 2 SO<sub>x</sub> 排出量

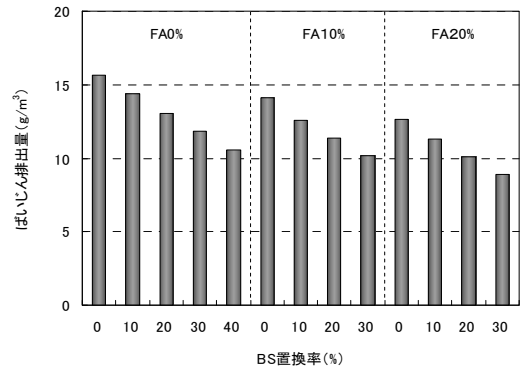


図-1 4 ばいじん排出量

4) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針 (試案)，コンクリートライブラリー125，2005.

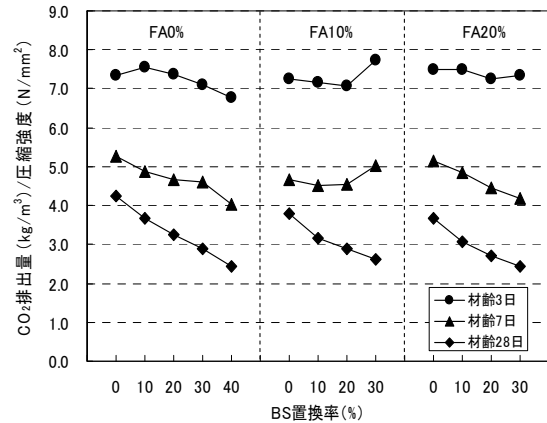


図-1 5 コンクリートの圧縮強度に対する CO<sub>2</sub> 排出量の比

### Basic Performance of Environmental Impact Reduction Concrete Using Ground Granulated Blast-Furnace Slag and Fly Ash

Takeju MATSUKA, Kazuto FUKUDOME, Mamoru SAKAMOTO, Eiichi SAITO, Yasunori SUZUKI and Koji SAKAI

In this study, the effect of fly ash and ground granulated blast-furnace slag on fresh properties, strength properties, and durability of concrete was examined. In addition, the effect of the admixtures on the reduction of environmental impact was clarified. When the ground granulated blast-furnace slag and fly ash were used, early strength of the concrete was seen to be decreased compared to that of the concrete without the admixtures. However, compressive strength at the age of 28 days, fresh properties, and durability of the concrete were the same as those of the concrete without the admixtures. Moreover, CO<sub>2</sub> emission per compressive strength of the concrete was reduced when the fly ash and ground granulated blast-furnace slag were increased.