

論文 フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートの諸特性

松家 武樹^{*1}・堺 孝司^{*2}・鈴木 康範^{*3}・福留 和人^{*4}

要旨: 本研究はフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の組合せによるコンクリートの一般性能および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、上記の混和材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、フライアッシュ置換率 20%および高炉スラグ微粉末置換率 30%までの併用は、混和材無混入と比べて初期強度を低下させるが、材齢 28 日の強度やコンクリートのフレッシュ性状ならびに耐久性は同等程度の性能であること、およびコンクリートの圧縮強度あたりの CO₂ 排出量が減少す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, CO₂ 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」、つまり「ローカーボン性能」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 CO₂ 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 CO₂ を削減させる一つの有効な手段である。その代表的な例が、高炉セメントやフライアッシュセメントを用いた従来の混合セメントであるが、従来、混和材の利用は、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・耐久性能」と「ローカーボン」の最適化を目指したものではない。

一方、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末（以下、高炉スラグと略記）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^{1),2),3)}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「ローカーボン」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上記の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°C、相対湿度 60%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、混和材混合率の組合せを示す。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

*1 (株) 間組 技術・環境本部 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

*2 香川大学 工学部 安全システム建設工学科 工博 (正会員)

*3 住友大阪セメント (株) セメントコンクリート研究所 工博 (正会員)

*4 (株) 間組 技術・環境本部 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

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 ³ ，比表面積：3430cm ² /g
フライアッシュ	フライアッシュ II種	FA	密度：2.25g/cm ³ ，比表面積：4150cm ² /g
高炉スラグ 微粉末	高炉スラグ微粉末 4000	BS	密度：2.89g/cm ³ ，比表面積：4170cm ² /g
細骨材	川砂	S	密度：2.62g/cm ³ ，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 ³ ， 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 ³ ， 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

した。表-3に、コンクリートの配合を示す。

2.3 試験項目

(1) フレッシュコンクリート

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。

(2) 硬化コンクリート

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)，自己収縮試験および乾燥収縮試験 (JIS A 1129) を行った。

圧縮強度および割裂引張強度試験は、供試体作製後 1 日で脱型し、その後、20℃の水中養生を行い、材齢 3 日，7 日，28 日で行った。自己収縮試験は、100mm×100mm×400mm 供試体を使用し、JCI 自己収縮研究委員会の方法⁴⁾に準じて行った。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た。なお、実測ひずみから温度ひずみ (熱膨張係数 10μ/℃) を差し引いた値を自己収縮ひずみとし、自己収縮の測定開始はコン

表-2 混和材混合率の組合せ

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

クリートの始発時間とした。乾燥収縮試験は、100×100×400mm の供試体を用い、ダイヤルゲージ方法で行った。

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³⁾で報告されているが、セメント量の減少に伴う C₃A および C₄AF 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⁵⁾。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

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 ³)						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 ³)	(C+FA+BS) × %	(kg/m ³)
								川砂 S	碎石	G1	G2				
40	0	46	46	140	350	0	0	848	620	412	0.80	2.80	0.12	0.42	
				138	311	0	35	851	623	414	0.80	2.77	0.12	0.42	
				136	272	0	68	855	625	415	0.80	2.72	0.12	0.41	
				135	238	0	102	853	624	415	0.80	2.72	0.12	0.41	
				133	200	0	133	859	628	417	0.80	2.66	0.12	0.40	
	10	135		304	34	0	854	624	415	0.80	2.70	0.25	0.85		
		130		260	33	33	864	632	420	0.80	2.61	0.25	0.82		
		128		224	32	64	867	634	421	0.80	2.56	0.25	0.80		
		126		189	32	95	871	637	423	0.80	2.53	0.20	0.63		
	20	131		262	66	0	858	627	417	0.80	2.62	0.40	1.31		
		127		223	64	32	865	633	420	0.80	2.55	0.40	1.28		
		124		186	62	62	871	637	423	0.80	2.48	0.40	1.24		
				121	152	61	91	877	641	426	0.80	2.43	0.35	1.06	

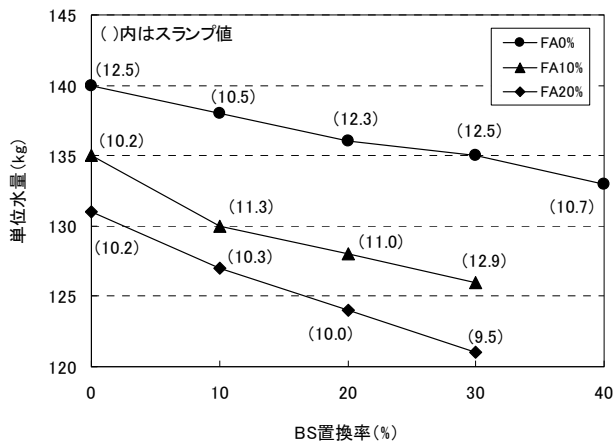


図-1 単位水量

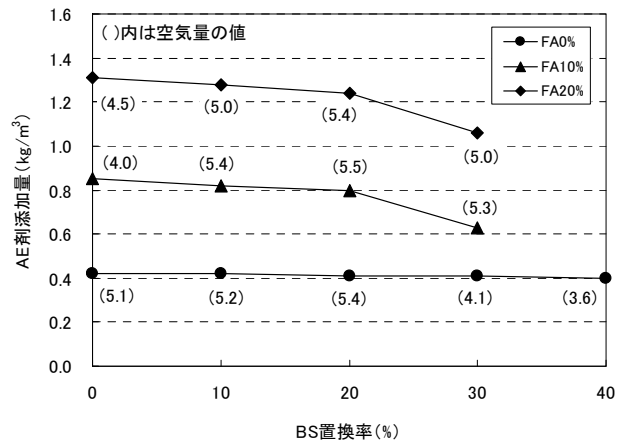


図-2 AE 剤添加量

いることに起因するものである。

(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。

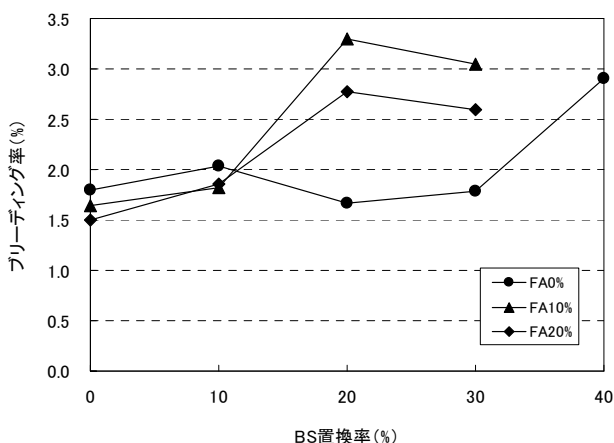


図-3 ブリーディング率

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

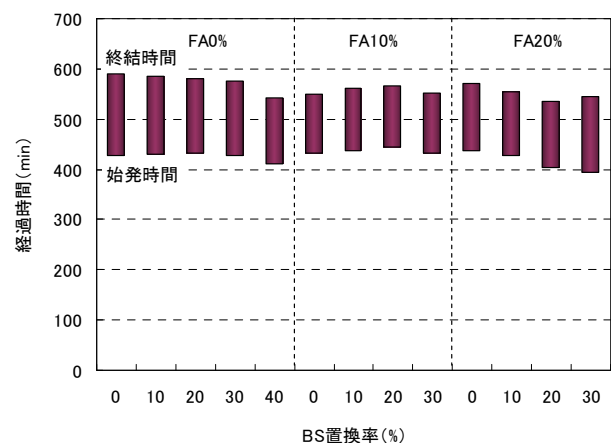


図-4 凝結時間

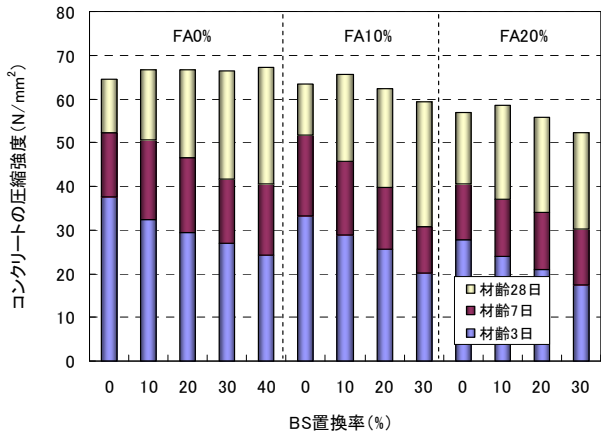


図-5 コンクリートの圧縮強度

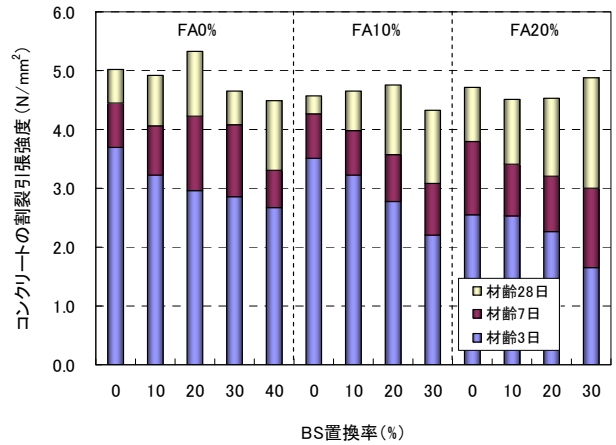


図-7 コンクリートの割裂引張強度

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間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ポゾラン反応と、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。

(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

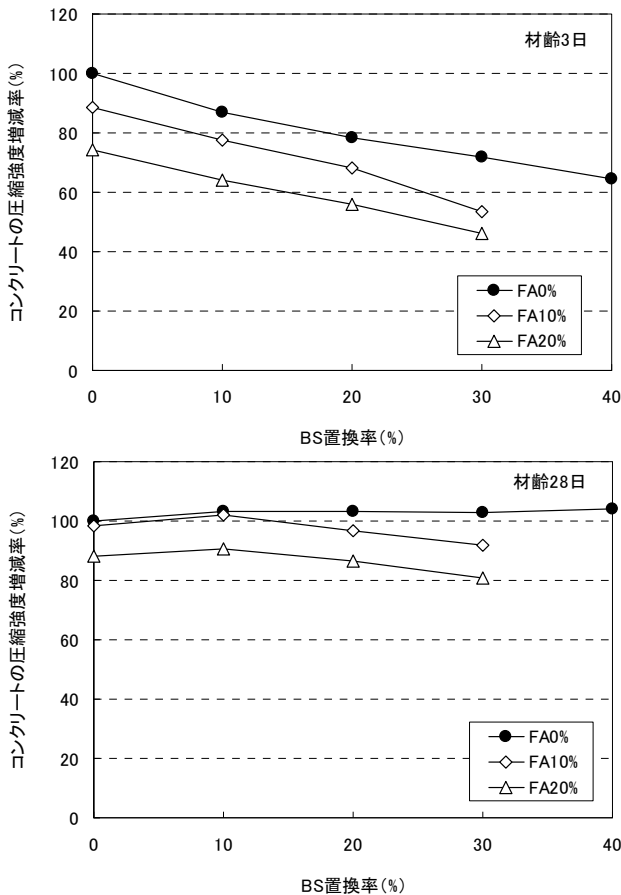


図-6 コンクリートの圧縮強度増減率

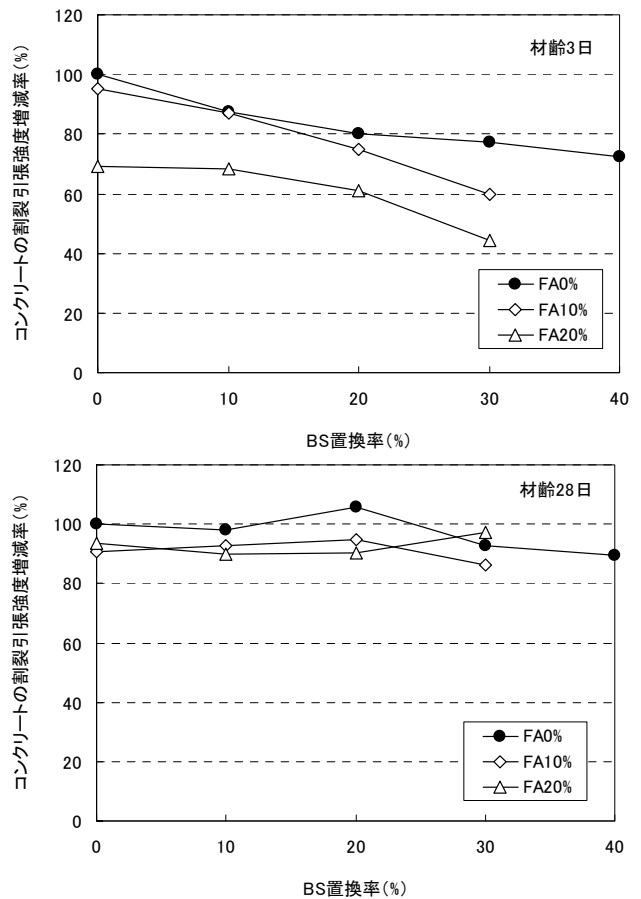


図-8 コンクリートの割裂引張強度増減率

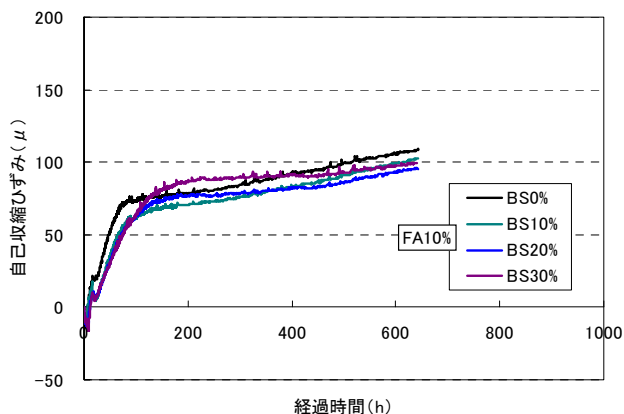


図-9 コンクリートの自己収縮ひずみの経時変化

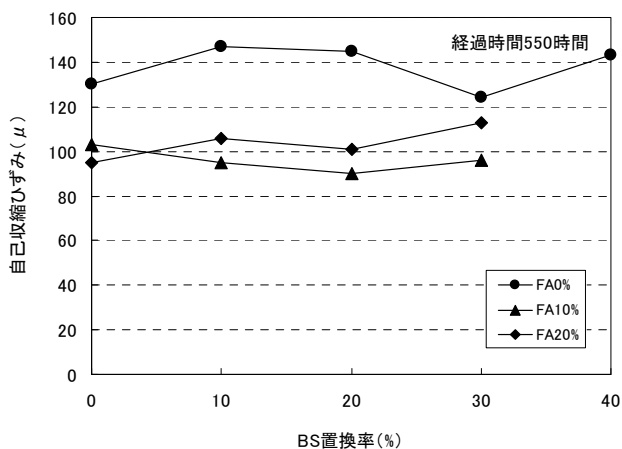


図-10 コンクリートの自己収縮ひずみ

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 14%の低下である。

(3) 自己収縮ひずみ

図-9 に、フライアッシュ置換率 10%および高炉スラグ置換率 0%から 30%のコンクリートの自己収縮ひずみの一例を示す。コンクリートの始発時間から 600 時間を経過してもコンクリートの自己収縮ひずみ量は収束していない。図-10 に、各配合における経過時間 550 時間後の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-11 に、フライアッシュ置換率 10%および高炉スラグ置換率 0%から 30%のコンクリートの乾燥収縮ひずみの一例を示す。前述した自己収縮ひずみの結果と同様に、乾燥収縮ひずみの値は収束していない。図-12 に、各配合における材齢 28 日の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

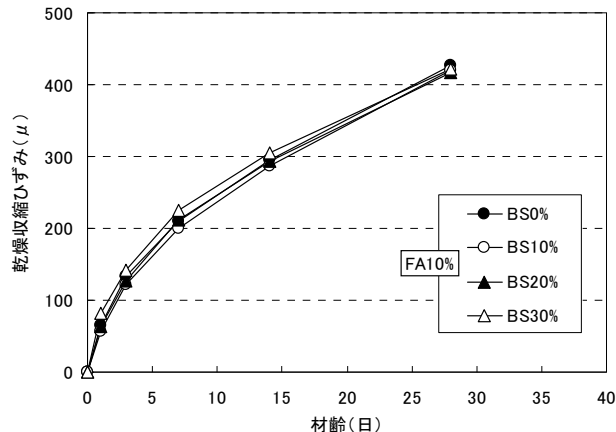


図-11 コンクリートの乾燥収縮ひずみと材齢の関係

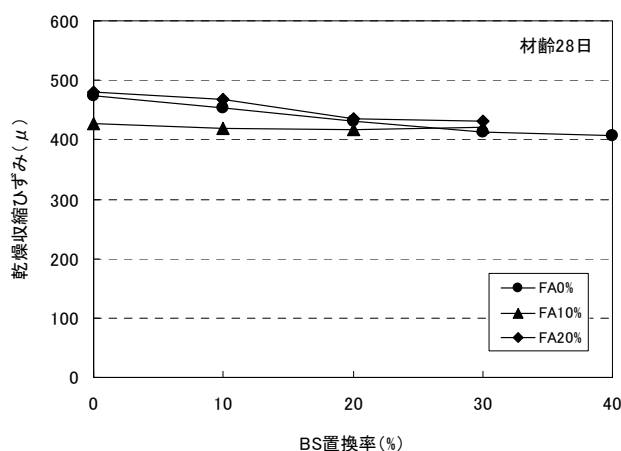


図-12 コンクリートの乾燥収縮ひずみ

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 CO₂ 排出量を算出の対象にしている。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)」⁶⁾より引用した。表-4 に、コンクリートの製造に必要な材料の CO₂ 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 CO₂ 排出量

図-13 に、各配合における CO₂ 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、CO₂ 排出量は減少している。なお、本実験の範囲内における各配合の CO₂ 排出量は、127kg/m³ から 275kg/m³ である。

表-4 CO₂の排出原単位

材料名	CO ₂ 原単位 (kg-CO ₂ /t)
ポルトランドセメント	765.5
フライアッシュ	17.9
高炉スラグ	26.5
細骨材	3.7
粗骨材	2.9
高性能AE減水剤	187.5

図-14に、コンクリートの圧縮強度に対するCO₂排出量の比を示す。ここに示す値は1N/mm²のコンクリートの圧縮強度を得るために排出されるCO₂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CO₂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日の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。

5. まとめ

フライアッシュ置換率 20%および高炉スラグ微粉末置換率 30%までの範囲における本研究の結果をまとめると以下の通りである。

- (1) フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の併用は、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) フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の併用は、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) 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%および55%低下させるが、材齢28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におけるその低下率は最大19%および14%と小さくなる。
- (4) 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) フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の併用は、混和材無混入に比べ、材齢28日における1N/mm²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CO₂量を小さくできる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、香川大学工学部安全システム建設工学科の佐竹比佳利氏には、実験にご協力を頂

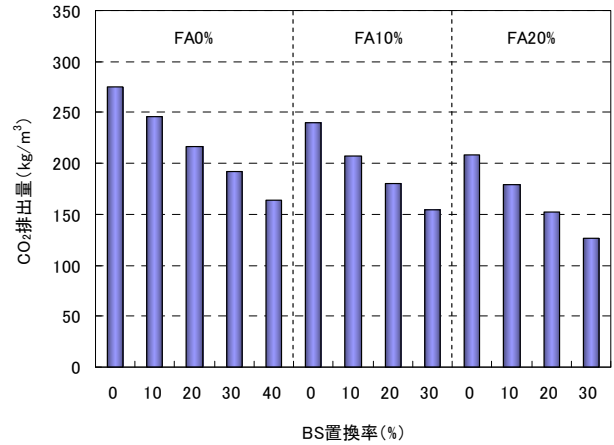


図-13 CO₂排出量

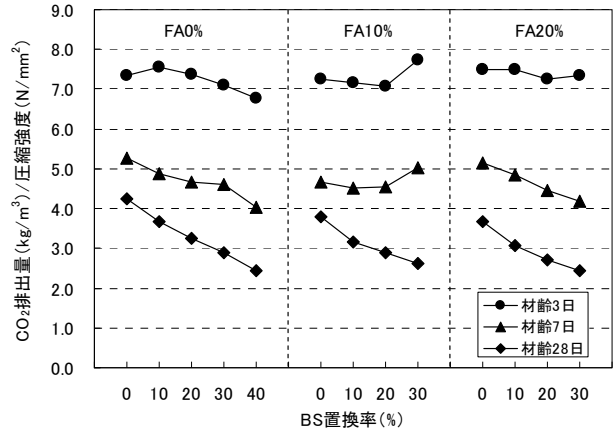


図-14 コンクリートの圧縮強度に対するCO₂排出量の比

いた。ここに、深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 近松竜一, 竹田宣典, 十河茂幸: 異種粒度の結合材を用いたフレッシュコンクリートの性質, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.93-98, 1990.
- 2) 石井光裕, 浮田和明, 東邦和, 山本和夫: 分級フライアッシュを混入した高強度コンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.263-268, 1991.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.