

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強度特性と細孔構造に関する研究

福留和人^{*1}・松家武樹^{*2}・坂本 守^{*1}・斎藤栄一^{*3}・齋藤 淳^{*1}・堺 孝司^{*4}・鈴木康範^{*5}

本研究は、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を組合せたコンクリートのフレッシュ性状および強度特性ならびに細孔構造に及ぼす影響と CO_2 排出量の低減効果について検討したものである。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 40%までの範囲におけるコンクリートへの利用は、混和材無混入と比べて平均細孔直径を小さくさせること、およびコンクリートの単位圧縮強度あたりの CO_2 排出量を減少させることができ明らかとなった。さらに、水結合材比を小さくすることで単位圧縮強度あたりの CO_2 排出量は小さくな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、 CO_2 排出量、強度特性、細孔構造

1. はじめに

従来のコンクリートは、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¹⁾。したがって、今後、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。「低環境負荷性」は環境問題を論じる上で広義の意味があるが、本論文では「低環境負荷性」の一つである「ローカーボン性能」に着目する。「ローカーボン性能」とは、コンクリートを構成する材料を製造する際に排出される CO_2 量の程度のことであり、フライアッシュや高炉スラグ微粉末（以下、高炉スラグと略記）などの混和材を用いていない標準コンクリートよりも CO_2 排出量が下回るコンクリートは、その性能が高いことを意味するものである。

コンクリートの材料の中で最も CO_2 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_2 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が目的であった。一方、混和材の利用によるセメント量の低減はコンクリートが有するローカーボン性能を高める効果はあるが、初期強度の低下や中性化速度の増大などの性能の低下を招くためフライアッシュや高炉スラグの置換率には自ずと限界がある。

近年、 CO_2 排出量の削減の観点から混和材をセメントに高置換する研究が行われているが、コンクリートの初期強度が著しく低下することが報告²⁾されている。今後、

混和材を利用していく上でコンクリートの「力学・耐久性能」と「ローカーボン性能」との最適化を図ることが重要であり、コンクリートの基本性能とローカーボン性能のバランスのとれたコンクリートの開発が望まれる。著者らは、これまで水結合材比 40%に限定したフライアッシュおよび高炉スラブを用いたコンクリートの「基本性能」と「ローカーボン性能」についての基礎的な検討³⁾を行ってきた。本研究では、水結合材比 55%を対象にし、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強度特性ならびに細孔構造に及ぼす影響と上記の混和材利用に伴う CO_2 排出量の低減効果について明らかにした。

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 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の試験室で、容量 60 リットルの強制二軸ミキサを用いて行った。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 55%，細骨材率（以下 s/a と略記）49%，AE 減水剤の量を結合材に対して 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（以下、FA 置換率と略記）

*1 技術研究所 *2 技術第二部 *3 環境部 *4 香川大学 *5 住友大阪セメント(株)

表-1 使用材料

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 : 3400cm 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 : 2.88g/cm ³ , 比表面積 : 4250cm ² /g
細骨材	川砂	S	密度 : 2.62g/cm ³ , 吸水率 : 1.35%, 粗粒率 : 2.81, 微粒分量 : 2.62%, 実積率 : 67.4%
粗骨材	碎石	G1	最大寸法 : 20mm, 密度 : 2.71g/cm ³ , 吸水率 : 0.69%, 粗粒率 : 7.08, 実積率 : 59.2%
		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	AE減水剤	-	リグニンスルホン酸化合物と ポリカルボン酸エーテルの複合体
	AE剤	-	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

を 0, 10, 20%, 高炉スラグの置換率（以下、BS 置換率と略記）を 0, 10, 20, 30, 40% とし、これらを組合せ 9 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。

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	○	-	○	-	-

2.3 試験項目および方法

(1) スランプ、空気量、ブリーディングおよび凝結試験

験

スランプ、空気量、ブリーディングおよび凝結試験は、それぞれ JIS A 1101, JIS A 1128, JIS A 1123 および JIS A 1147 に準拠して行った。なお、本実験では目標スランプを 12.0±2.5cm、目標空気量を 4.5±1.0% とした。

(2) 圧縮強度、静弾性係数および割裂引張強度

表-3 コンクリートの配合

W/B (%)	FA 置換率 (%)	BS 置換率 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							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		G1	G2	(C+FA+BS) × %	(kg/m ³)	(C+FA+BS) × %	(kg/m ³)
								川砂 S	碎石 S						
55	0	0	49	161	293	0	0	900	484	484	0.80	2.34	0.00	0.00	
		20		159	231	0	58	902	485	485	0.80	2.31	0.00	0.00	
		30		158	201	0	86	903	486	486	0.80	2.30	0.08	0.23	
		40		157	171	0	114	904	487	487	0.80	2.28	0.11	0.31	
	10	10		154	224	28	28	909	489	489	0.80	2.24	0.30	0.84	
		20		153	195	28	56	910	490	490	0.80	2.23	0.35	0.98	
		30		152	166	28	83	911	490	490	0.80	2.22	0.40	1.11	
	20	0		150	218	55	0	913	492	492	0.80	2.18	0.60	1.64	
		20		148	161	54	54	916	493	493	0.80	2.15	0.67	1.80	

コンクリートの圧縮強度試験、静弾性係数試験および割裂引張強度試験は、それぞれ JIS A 1108, JIS A 1149 および JIS A 1113 に準拠して行った。

コンクリートの圧縮強度試験に用いた供試体の養生は、表-4 に示す 5 つの養生方法で行った。詳述すると、室温 5°C, 20°C および 30°C の試験室でコンクリートを打込み、その後各室温において封緘養生を行い、翌日型枠脱型後、室温 5°C, 20°C および 30°C の試験室に設置している水槽に供試体を入れ水中養生を行う場合の 3 ケースと、室温 20°C の試験室でコンクリートを打込み、材齢 1 日および 7 日間封緘養生した後、型枠脱型し、温度 20°C 相対湿度 60% に制御した試験室で気中養生した場合の 2 ケースである。なお、圧縮試験の材齢はそれぞれ 3, 7 および 28 日であり、静弾性係数の測定は材齢 28 日のみで行った。割裂引張強度試験は、室温 20°C の試験室でコンクリートを打込み、その後封緘養生を行い、翌日型枠脱型後、室温 20°C の試験室に設置している水槽に供試体を入れ水中養生を行い、材齢 3, 7 および 28 日で行った。

(3) 細孔径分布

細孔径分布の測定は、水銀圧入式ポロシメーターを用いて行った。試料は φ 100×200mm の供試体を所定の材齢まで室温 20°C の試験室に設置している水槽に入れ水中養生の後、供試体からモルタルを取り出し、2.5mm から 5mm に粒度調整をしたものである。なお、測定範囲は細孔直径 128 μm から 3nm とした。試験材齢は 7 および 28 日である。

表-4 養生方法

記号	材齢(日)			
	1	3	7	28
水中養生5°C	封緘(5°C)			水中(5°C)
水中養生20°C	封緘(20°C)			水中(20°C)
水中養生30°C	封緘(30°C)			水中(30°C)
気中養生	封緘(20°C)			気中(20°C-RH60%)
封緘養生		封緘(20°C)		気中(20°C-RH60%)

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。同図には、水結合材比40%における著者らの既往の研究データ³⁾も示す。何れの水結合材比においても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、フライアッシュのポ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。

(2) AE剤添加量

図-2に、本研究における各配合のAE剤添加量および著者らの既往の研究データ³⁾を示す。何れの水結合材比においても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⁴⁾。

一方、高炉スラグの混入は、水結合材比の違いにより、AE剤添加量の傾向が異なる結果となった。水結合材比40%の場合では、高炉スラグ置換率の増加と共にAE剤添

加量は減少するが、水結合材比55%ではその添加量が増加する傾向を示している。水結合材比40%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り、本研究の水結合材比55%では、高炉スラグの比表面積がセメントよりも大きいことに起因するものである。

(3) ブリーディング量

図-3に、本研究および著者らの既往の研究³⁾で得られたブリーディング量を示す。本研究における混和材の組合せがブリーディングに及ぼす影響は、単位水量、単位粉体量、各結合材の水分吸着量などの因子が複雑に絡み合った結果であり、それぞれの寄与の程度については明確ではない。なお、本研究で得られたブリーディング量は0.256～0.486cm³/cm²の範囲である。

(4) 凝結時間

図-4に、本研究および著者らの既往の研究³⁾で得られた凝結時間を示す。一般に、高炉スラグの置換率の増加と共に凝結時間は遅延することが報告⁵⁾されており、本研究および既往の研究データは同様の傾向となった。フライアッシュの混入がコンクリートの始発時間および終結時間に及ぼす影響は小さい。なお、本研究におけるコンクリートの始発時間および終結時間は、それぞれ293～428分および451～594分の範囲である。

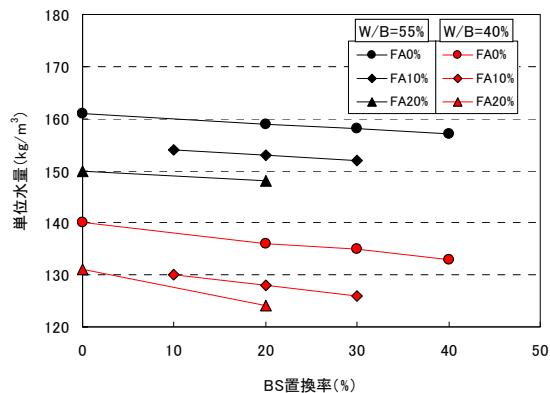


図-1 混和材置換率と単位水量の関係

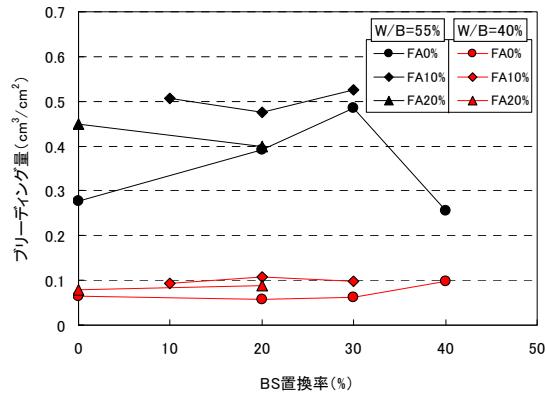


図-3 混和材置換率とブリーディング量の関係

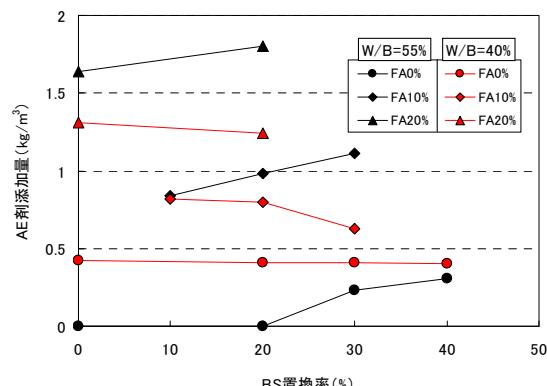


図-2 混和材置換率とAE剤添加量の関係

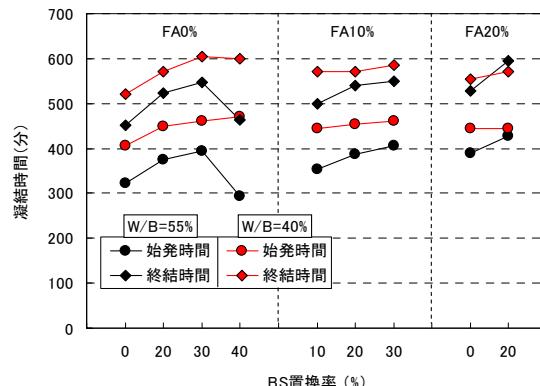


図-4 混和材置換率と凝結時間の関係

3.2 硬化コンクリート

(1) 圧縮強度

図-5に、水中養生 20°Cの養生条件下におけるコンクリートの圧縮強度の一例を示す。図-6には、単位セメント量と材齢3日における水中養生 20°Cの条件下で養生したコンクリートの圧縮強度の関係を示す。同図には、水結合材比 40%における著者らの既往のデータ³⁾も併せて示す。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起因するものであり、いずれの水結合材比においても材齢3日における圧縮強度と単位セメント量の関係には相関関係がある。

図-7には、上記表-4に示した5つの養生条件下における材齢3, 7, 28日のコンクリートの圧縮強度増減率を示す。同図は各材齢における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。いずれの養生条件下においても材齢の経過と共に、混和材混入に伴う圧縮強度の低下率は小さくなっている。これは、フライアッシュのポゾラン反応と高炉スラグの潜在水硬性の影響によるものである。なお、材齢3日の水中養生 5°C, 20°C, 30°C、および封緘養生ならびに気中養生の場合における混和材混入に伴うコンクリートの圧縮強度低下率の最大値は、それぞれ 69%, 62%, 47%, 59%, 58%であり、材齢28日におけるそれぞれの低下率の最大値は 43%, 30%,

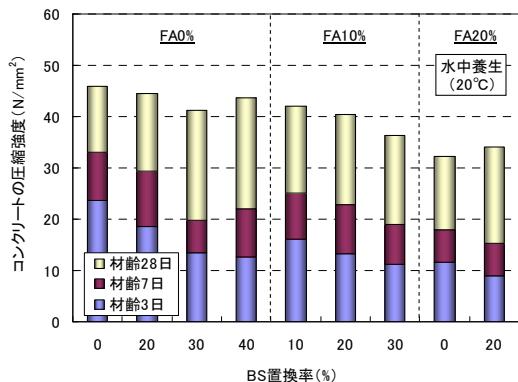


図-5 混和材置換率と圧縮強度の関係

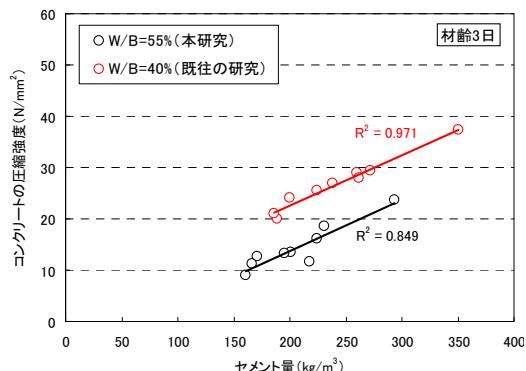


図-6 セメント量と圧縮強度の関係

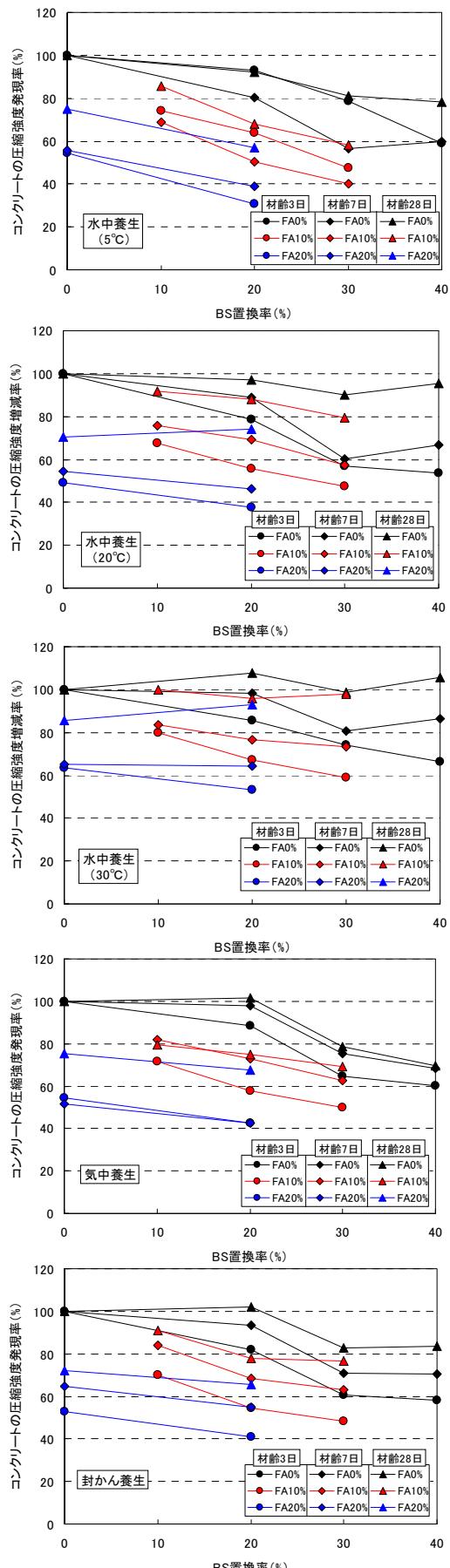


図-7 混和材置換率と圧縮強度発現率の関係

14%, 35%, 32%である。養生温度が低い場合、混和材混入に伴う圧縮強度の低下率は大きくなっている。フライアッシュおよび高炉スラグを併用したコンクリートは、養生温度の影響を受けやすいことを示唆している。

図-8に、コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。同図には、土木学会コンクリート標準示方書⁶⁾に記されている静弾性係数の結果も示す。静弾性係数の値は、フライアッシュおよび高炉スラグ置換率による影響は見られない結果となった。一方、養生条件がコンクリートの静弾性係数に及ぼす影響については、封緘養生および気中養生の場合、他のものと比較して全体的に小さくなっているおり、この原因については今後詳細な検討が必要である。なお、本研究で得られた静弾性係数の値は、前記示方書に示されている値と同程度である。

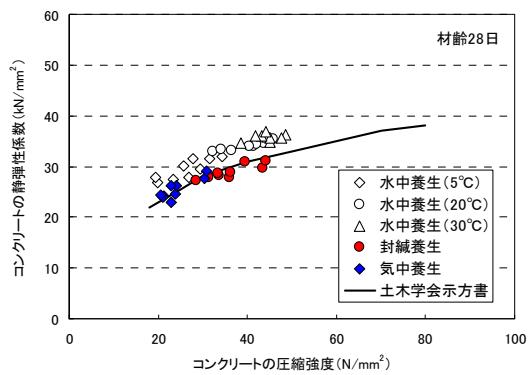


図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係

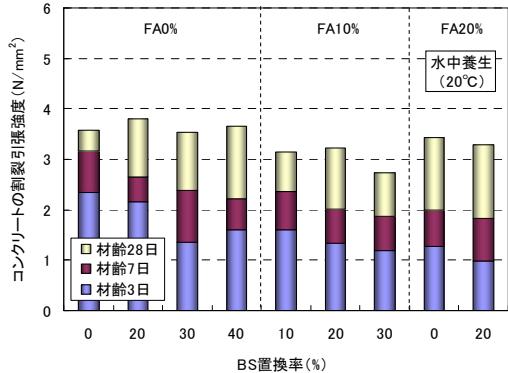


図-9 混和材置換率と割裂引張強度の関係

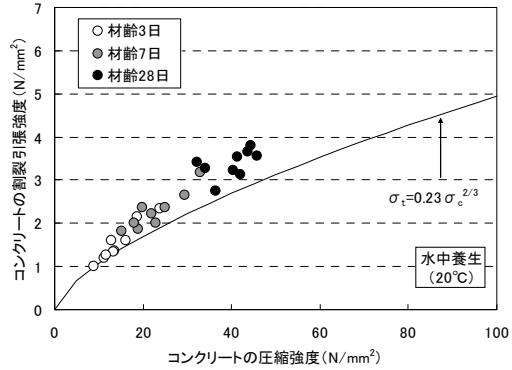


図-10 圧縮強度と割裂引張強度の関係

(2) 割裂引張強度

図-9に、水中養生20°Cの養生条件下における材齢3, 7, 28日のコンクリートの割裂引張強度の一例を示す。

図-10には、コンクリートの割裂引張強度と圧縮強度の関係を示す。同図にはコンクリート標準示方書⁶⁾に示されている式より算出した計算結果も示す。本実験で得られた値は、上述の式より算出した値と同程度である。

(3) 細孔径分布

図-11に、水中養生20°Cの養生条件下における材齢7および28日のコンクリートの圧縮強度と50nm以上の細孔容量の関係を示す。一般に、50nm以上の毛細管空隙量と圧縮強度との関係には高い相関性があると報告されている⁷⁾が、本研究においても混和材の有無および材齢に関係なく、コンクリートの圧縮強度と50nm以上の毛細管空隙量には相関性があり、相関係数は0.88であった。

図-12には、水中養生20°Cの養生条件下における材齢7および28日のコンクリートの平均細孔直径を示す。材齢の経過および高炉スラグの置換率の増加と共に、平均細孔直径は小さくなっている。

さらに、フライアッシュおよび高炉スラグを併用した場合についても、混和材無混入に比して、平均細孔直径は小さくなる傾向がある。これらは混和材混入に伴う充填効果、およびフライアッシュのポゾラン反応、ならびに高炉スラグの潜在水硬性に起因するものと考えられる。

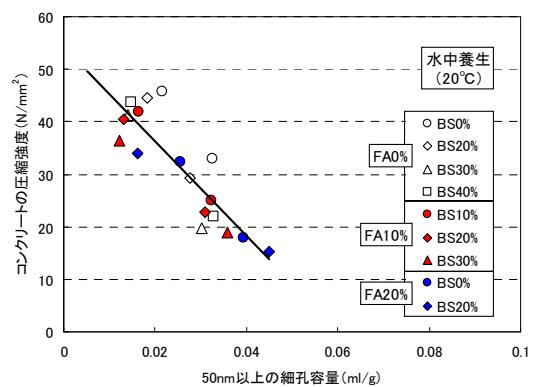


図-11 50nm以上の細孔容量と圧縮強度の関係

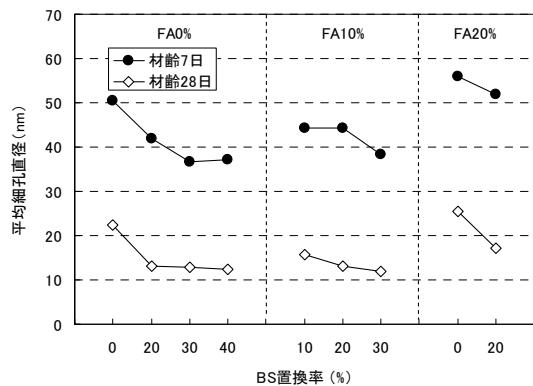


図-12 混和材置換率と平均細孔直径の関係

4. 混和材利用による環境評価

4.1 算出方法

インベントリデータは、日本コンクリート工学協会より発刊されている報告書⁸⁾より引用し、ポルトランドセメント、フライアッシュ、高炉スラグ、細骨材、粗骨材、AE 減水剤の CO_2 排出原単位は、それぞれ 798.1, 29.0, 40.4, 4.9, 3.9, 125.0 kg-CO₂/t とした。なお、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 CO_2 排出量

図-13 に、本研究および著者らの既往の研究³⁾で得られた各配合における CO_2 排出量を示す。いずれの水結合材比においても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_2 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 CO_2 排出量は、 141kg/m^3 から 242kg/m^3 である。

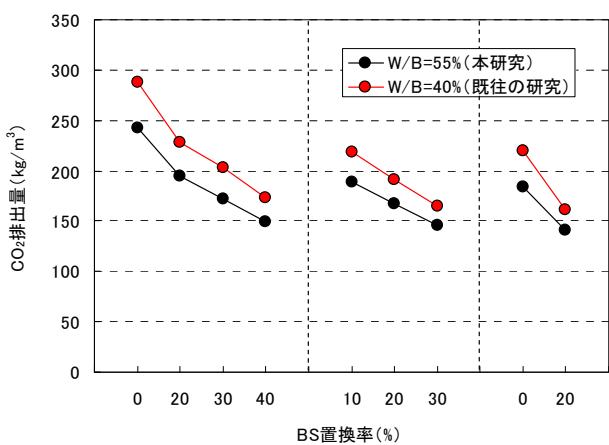


図-13 混和材置換率と CO_2 排出量の関係

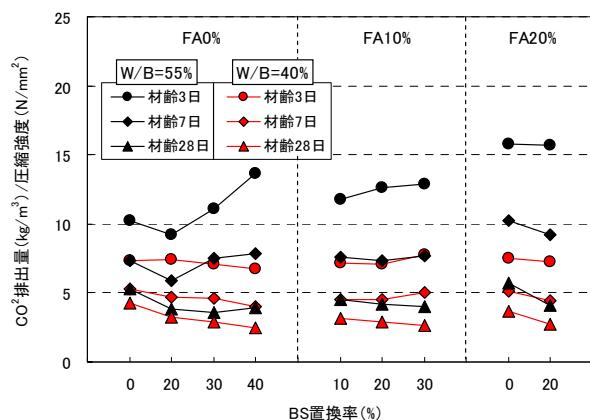


図-14 混和材置換率と圧縮強度に対する CO_2 排出量の比の関係

図-14 に、コンクリートの圧縮強度に対する CO_2 排出量の比を示す。ここに示す値は 1N/mm^2 のコンクリートの圧縮強度を得るために排出される CO_2 量（以下、単位圧縮強度あたりの CO_2 排出量と略記）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。水結合材比 55%における材齢 3 日の圧縮強度に対する CO_2 排出量の比は、混和材の増加と共に大きくなる傾向があるが、材齢の経過に伴い、その傾向は反転している。材齢 28 日の時点では、混和材の混入は無混入の場合より、単位圧縮強度あたりの CO_2 排出量の比は小さくなっている。なお、既往の研究で得られた水結合材比 40%の結果と比較すると、水結合材比 40%の方が水結合材比 55%よりも、その比は小さくなっている。このことはコンクリートの単位圧縮強度あたりの CO_2 排出量の観点から考察すると、水結合材比を小さくする方が効率的であ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%および高炉スラグ微粉末置換率 40%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、養生温度の影響を受けやすく、養生温度が低い場合、混和材混入に伴う圧縮強度の低下率は大きい。
- (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、平均細孔直径を小さくさせる。
- (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/mm^2 のコンクリートの圧縮強度を得るために排出される CO_2 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山口聖治氏には、実験にご協力を頂いた。ここに、深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 社団法人日本コンクリート工学協会：特集 / CO₂削減に向けて、コンクリート工学誌, Vol. 48, No. 9, pp. 8-15, 2010.
- 2) 大澤友広, 平田隆祥, 二戸信和, 人見尚 : 種々の混和材を高置換したセメント系混合材料の基礎物性とCO₂削減効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 179-184, 2010.
- 3) 松家武樹, 塚孝司, 鈴木康範, 福留和人 : 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 32, No. 1, pp. 185-9190, 2010.
- 4) 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.
- 5) 日本建築学会 : 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの技術の現状, 1992.
- 6) 土木学会 : コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002.
- 7) 社団法人日本コンクリート工学協会 : 反応モデル解析研究委員会報告書 (I), 1996.
- 8) 社団法人日本コンクリート工学協会 : コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究委員会報告書, 2010.

Pore Structure and Strength Property of Low-Carbon Concrete Using Fly Ash and Blast-Furnace Slag

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

In this study, the effect of fly ash and ground granulated blast-furnace slag on fresh properties, strength properties, and pore structure was examined. In addition, the effect of the reduction of environmental impact of those admixtures was clarified.

From the test results, it can be concluded that (1) when the ground granulated blast furnace slag and fly ash are used, the early strength of concrete decreases compared with concrete without the admixtures, (2) when the curing temperature of concrete is low, the rate of reduction in compressive strength of concrete is large compared with concrete without the admixtures, (3) the average pore size of concrete decreased compared with concrete without the admixtures and (4) the amount of CO₂ emission per 1N/mm² of concrete compressive strength decreases when the amount of fly ash and ground granulated blast-furnace slag increases.