

高流動コンクリートに関する研究

- 高炉セメント B 種にフライアッシュを用いた場合 -

宮本 欣明^{*1} 山本 康弘^{*2}

Study on the Properties of High-Fluidity Concrete

- Case of Using Portland Blast-Furnace Slag Cement and Fly Ash -

Yoshiaki MIYAMOTO^{*1} Yasuhiro YAMAMOTO^{*2}

This paper is intended to study the effect of the mix proportion on the rheological figures, strength and shrinkage ratio of the high-fluidity concrete using portland blast-furnace slag cement and fly ash. The relationship between the mix proportion and the fluidity etc. of the concrete was investigated regarding several experimental factors such as kind of fly ash, mixing ratio of fly ash to portland blast-furnace slag cement, mixing ratio of super plasticizer, and so on. The rheological characteristics of the high-fluidity concrete such as plastic viscosity and yield value were measured by using the J shaped flow test. The main results on the fluidity are as follows.

- 1) In case of increasing the mixing ratio of Type fly ash and Type fly ash, the plastic viscosity and the yield value decrease.
- 2) The plastic viscosity and the yield value of the concrete which mixed Type fly ash to 15% are smaller than those of the concrete using portland blast-furnace slag cement with little addition quantity of super plasticizer.

1. はじめに

今日、高流動コンクリートは非常に高い流動性により、打放しコンクリートや締固めが困難な高密度配筋部位やコンクリート充填鋼管構造などに多く使用されるようになってきた。しかしながら、フレッシュな状態の高流動コンクリートの流動特性（塑性粘度および降伏値）については、適切な試験方法が確立されておらず、スランプフロー試験をはじめとし、多くの評価試験方法が提案されている¹⁾。新藤、松岡、早川はU型の充填試験方法により相対的な充填性を評価したが²⁾、断面が四角形であるため解析が難しく物理量としての流動特性は得られていない。また、友澤、野口らは、円柱を一定速度で動かし円柱に働く抵抗力を測定することにより³⁾、また、谷川、森らは、せん断ボックス試験によりせん断速度とせん断応力の関係を測定することにより⁴⁾

レオロジー定数を算出した。しかし、これらのレオロジー試験は、前者は、正確な降伏値の測定が困難なこと、また後者は塑性粘度の測定が不正確であり、また測定作業が複雑で、測定に長時間を要しコンクリートの性状が変化する可能性を含んでいた。これに対し、山本らは、J型の円断面の導管を用いたJ型フロー試験により、敏速かつ正確にコンクリートのレオロジー定数を物理量として評価できることを報告した⁵⁾。

本研究は、このJ型フロー試験により高流動コンクリートの流動特性を評価するとともに、コンクリートの調合要因が流動特性に及ぼす効果について検討したものである。筆者らは、高流動コンクリートの調合要因と流動特性の関係を明らかにすることを目的とし、一連の研究を続けてきた^{6) 7)}。本研究では、高流動コンクリートに適したセメントとして高炉セメン

^{*1} 東京工芸大学大学院工学研究科 建築学専攻
2003年9月11日 受理

^{*2} 東京工芸大学工学部建築学科教授

ト B 種をとりあげ、その一部をさらに流動特性の改善効果を有するフライアッシュ(種および 種)で置換した高流動コンクリートの流動特性について検討を行なった。この他、調合要因と圧縮強度および乾燥収縮率との関係についても検討した。

2. 実験計画

2.1 使用材料

本実験で使用した材料は表 1 に示したとおりである。フライアッシュ 種は比表面積 $5380\text{cm}^2/\text{g}$ 、種は比表面積 $3630\text{cm}^2/\text{g}$ のものを、セメントは高炉セメント B 種(記号: BB)および普通ポルトランドセメント(記号: N)を使用した。なお、粗骨材は 20mm のふるいにとどまる量を 5% に調整した。

2.2 コンクリートの調合

表 2 に実験要因と水準を示す。まず、実験 では高炉セメント B 種を結合材としたコンクリートを対象とし、実験要因に高性能 AE 減水剤の添加量を取りあげ、6 水準変化させた。なお、普通ポルトランドセメントを結合材としたコンクリートについても比較を目的に一部検討した。続いて、実験 では実験要因にフライアッシュの種類・置換率(%) をとりあげた。フライアッシュの種類は比表面積の異なる 種および 種の 2 水準とし、置換率は結合材(高炉セメント B 種とフライアッシュ)の質量に対し 10、15、30 および 45% の 4 水準とした。そして、実験 ではフライアッシュ 種を結合材(高炉セメント B 種とフライアッシュ 種)の質量に対し 15% 置換したコンクリートを対象とした。実験要因としては、まず混和剤である高性能 AE 減水剤の添加量および分離低減剤の添加量を取りあげた。続いて基本的調合要因である水結合材比および細骨材結合材比を取りあげ、さらに骨材の調合要因である細骨材率を取りあげた。そして、それぞれの実験要因について 5 水準変化させて実験を行った。

細骨材率に関しては実験に先立ち、粗骨材と細骨材が最大密度となる比率をあらかじめ調べた。試験は、細骨材と粗骨材の総質量を 5kg と一定とし、細骨材率のみを変化させた試料を $15 \times 30\text{cm}$ の円筒型枠に充填し、かさ高さをそれぞれ測定した。その結果は図 1

表 1 使用材料

セメント		高炉セメント B 種 密度 $3.02\text{g}/\text{cm}^3$
		普通ポルトランドセメント 密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
フライアッシュ	種	密度 $2.40\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積 $5380\text{cm}^2/\text{g}$
	種	密度 $2.24\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積 $3630\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材		砕砂 70%, 海砂 30% 表乾密度 $2.62\text{g}/\text{cm}^3$, f.m. 2.55
粗骨材		最大寸法 20mm 表乾密度 $2.64\text{g}/\text{cm}^3$, f.m. 6.83
混和剤	(SP)	高性能 AE 減水剤: ポリカルボン酸系
	(Vi)	分離低減剤: セルロースエーテル系
	(AE)	空気量調整剤

表 2 実験要因と水準

実験	実験要因	結合材	実験水準
	高性能AE減水剤 添加量（C×%）	BB	1.5, 1.6, 1.7 1.8, 2.0, 2.2
		N	1.5, 2.0, 2.6, 2.8
	フライアッシュの 種類・置換率 （%）	BB+FA 種	10, 15, 30, 45
		BB+FA 種	10, 15, 30, 45
		N +FA 種	15, 30, 45
	高性能AE減水剤 添加量（C×%）	BB+FA 種 置換率：15%	1.4, 1.5, 1.6 1.7, 1.8
	分離低減剤 添加量（W×%）		0, 0.1, 0.2 0.25, 0.3
	水結合材比（%）		30, 35, 40 45, 50
	細骨材結合材比		1.2, 1.4, 1.6 1.8, 2.0
	細骨材率（%）		35, 40, 45 50, 55

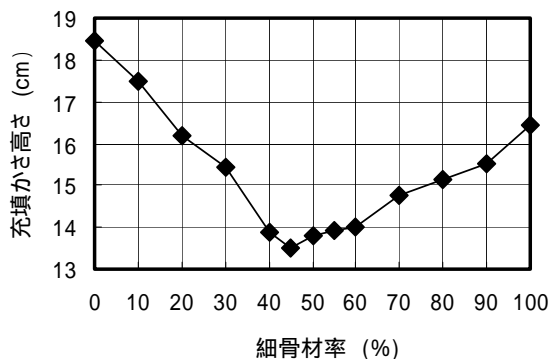


図 1 最密充填試験結果

実験	調合要因	セメントの種類	W/B (%)	S/B (%)	s/a	フライアッシュ		分離低減剤 (W×%)	高性能AE減水剤 (B×%)	単位量 (kg/m ³)					スラップフロー (cm)	塑性粘度 (Pa・s)	降伏値 (Pa)	air (%)	圧縮強度 (N/mm ²)					
						種類	置換率 (%)			セメント	混和材	水	細骨材	粗骨材					4週	13週				
	高性能AE減水剤の添加量	BB	40	1.62	45	無混入	0.2	1.5 1.6 1.7 1.8 2.0 2.2	455	0	182	738	903	47.6	85.2	90.8	4.0	61.0	72.4					
														51.9	90.0	83.4	4.4	62.8	76.5					
														64.0	73.9	29.0	4.0	61.4	74.1					
														68.2	62.7	24.7	4.4	60.0	74.0					
														69.9	63.2	24.6	3.6	63.4	75.0					
														70.9	71.2	0	3.0	67.9	80.3					
		N	40	1.64	45	無混入	0.2	1.5 2.0 2.6 2.8	455	0	182	745	911	25.4	-	-	4.1	-	-					
														42.4	110.7	122.5	4.5	67.1	72.4					
														54.6	116.4	60.0	4.5	70.9	70.3					
														59.1	110.6	45.4	4.2	70.5	71.4					
	フライアッシュの種類・置換率	BB	40	1.62 1.61 1.59 1.58 1.61 1.60 1.58 1.56	45	無混入	0.2	1.5	455	0	182	738	903	47.6	85.2	90.8	4.0	61.0	72.4					
														409	46	734	897	52.3	73.3	65.7	4.6	58.6	67.2	
														387	68	731	894	59.0	60.2	42.3	6.4	47.0	60.3	
														318	137	724	885	58.5	63.2	42.4	5.9	40.1	56.3	
														250	205	717	876	63.0	59.7	34.1	4.3	35.9	56.5	
														410	46	732	895	59.5	70.2	44.7	4.5	55.4	68.1	
						種	0.2	1.5	455	0	182	738	903	729	891	55.4	72.9	55.1	4.9	53.2	69.2			
														319	137	719	879	60.8	58.8	37.3	3.4	49.4	61.5	
														250	205	710	867	63.2	52.4	32.1	2.2	42.6	62.2	
														455	0	745	911	42.4	110.7	122.5	4.5	67.1	72.4	
														387	68	735	898	49.4	106.2	77.5	4.2	60.4	73.3	
														319	137	724	885	58.8	79.9	39.3	4.0	54.5	65.4	
		N	40	1.64 1.59 1.57	45	無混入	0.2	2.0	455	0	182	745	911	911	42.4	110.7	122.5	4.5	67.1	72.4				
															387	68	735	898	49.4	106.2	77.5	4.2	60.4	73.3
															319	137	724	885	58.8	79.9	39.3	4.0	54.5	65.4
															250	205	714	872	66.5	59.4	26.8	2.6	46.0	59.0
															48.9	85.0	66.7	4.4	53.5	65.8				
															55.4	72.9	55.1	4.9	53.2	69.2				
						種	0.2	1.6	387	68	182	729	891	57.5	74.1	36.8	4.9	52.2	68.9					
														60.5	71.0	24.5	5.0	50.0	66.4					
														66.3	72.6	29.7	4.9	51.1	66.8					
														74.3	-	-	2.5	53.0	67.4					
														66.9	54.5	3.4	4.5	59.7	71.1					
														60.5	71.0	24.5	5.0	50.0	66.4					
	分離低減剤の添加量		40	1.6	45	0.0 0.1 0.2 0.25 0.3	1.7	387	68	182	729	891	50.9	117.3	54.4	4.6	56.1	66.7						
													45.4	82.8	8.8	4.5	55.5	70.8						
													516	91	667	815	45.0	186.6	108.0	3.9	67.9	89.0		
													442	78	702	858	60.0	95.5	8.6	4.2	64.5	76.6		
													387	68	729	891	60.5	71.0	24.5	5.0	50.0			

(細骨材+1次水)調整練 60 秒 (セメント+フ
ライッシュ)1次練 120 秒 (2次水+分離低減剤
+AE 剤)2次練 120 秒 (粗骨材+高性能 AE 減
水剤)2次練 120 秒

2.4 フレッシュコンクリートの流動特性試験

フレッシュコンクリートの流動特性試験は、J型フロー試験を行い、あわせて JASS5T - 503 によるスランプフロー試験を行った。

J型フロー試験は、図2に示すJ型をした導管にコンクリートを充填し、圧力差とコンクリートの流下速度との関係を区間ごとに測定する試験であり、ビンガム流体とみなせるコンクリートのレオロジー定数(塑性粘度および降伏値)を測定することができる。

導管中のビンガム流体に駆動圧 P が作用して、試料が栓流状態で流れる場合には、図3のような構造モデルを形成する。この時、導管内の力の釣合い ($r^2 P = 2 r l P_t$) より、(1)式が成立する。

$$P_t = P r / 2l \quad (1)$$

$$r = R \text{ とすると } P = P R / 2l$$

次に、せん断応力 P_t はせん断速度 (速度勾配) dv/dr に比例し、また、ビンガム流体の場合は、所定のせん断応力以上にならないと流動が起らないことより、(2)式が成立する。

$$P_t = \tau_0 + \eta \cdot dv/dr \quad (2)$$

また、 $P_t = P r / 2l$ であるので、(2)式は(3)式に変形できる。

$$dv/dr = l / (P r / 2 - \tau_0) \quad (3)$$

これを積分すると流量 Q となり、Buckingham - Reiner の式が得られる。

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 l \lambda} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2 l \tau}{R \Delta P} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2 l \tau}{R \Delta P} \right)^4 \right] \quad (4)$$

なお (4)式は、降伏値 $\tau_0 = 0$ のニュートン流体では下式となり、これは Hagen-Poiseuille の法則と呼ばれている。

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 l \lambda}$$

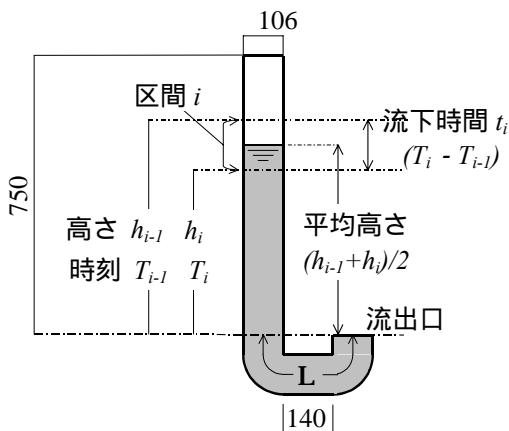
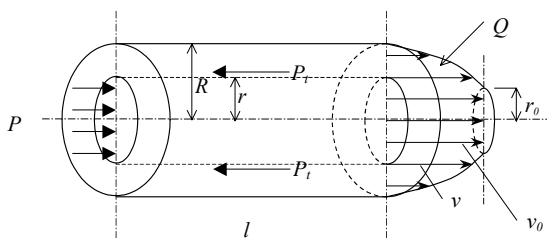


図2 J型フロー試験器



Q : 流量(cm^3/sec), P : 駆動圧(Pa),
 l : 導管の長さ(cm) R : 導管の半径(cm),
 r : 位置の半径(cm), r_0 : 栓流半径(cm)
 v : r の位置の流速(cm), v_0 : 栓流部の流速(cm)
 P_t : 半径 r 位置でのせん断応力(Pa)
 P : 半径 R 位置でのせん断応力(Pa)
 V : 半径 R 位置でのせん断速度(1/sec)
 η : 塑性粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$), τ_0 : 降伏値(Pa)

図3 導管内の栓流の構造モデル

次に、ビンガム流体の場合、(4)式に(1)式を代入することにより、管壁では(5)式が成立する。

$$P = \lambda V + \frac{4}{3} \tau - \frac{1}{3} \left(\frac{\tau}{P} \right)^3 \tau \quad (5)$$

(5)式は、 P ではなく V では以下になる。

$$P = \lambda V + \frac{4}{3} \tau \quad (6)$$

また、せん断速度 V が 0 に近い場合、 P は 1 に近づくため、 P は 1 に近づき(5)式は、以下のようになる。

$$P = \lambda V + \tau \quad (7)$$

ここで、図 2 において、区間 i におけるコンクリートの平均高さは $(h_{i-1} + h_i)/2$ であり、導管内の力の釣合い式(1)より(8)式が、また、区間 i のコンクリートの流下時間 t_i から(9)式が成立する。

$$P_i = \frac{\Delta P_i R}{2l_i} = \frac{\rho \cdot (h_{i-1} + h_i)/2 \cdot R}{L + (h_{i-1} + h_i)/2} \cdot \frac{R}{2} \quad (8)$$

$$V_i = \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{(h_{i-1} - h_i)}{t_i} \cdot \frac{4}{R} \quad (9)$$

ここに、 ρ : コンクリート密度(g/cm³)、 R : 導管半径(cm)、 l : 導管の長さ(cm)、 h_i 、 t_i : コンクリートの高さ(cm)、コンクリートの流下時間(sec)である。

以上より、J 型フロー試験においてコンクリートの流下する様子を測定することにより、(8)式および(9)式より各区間 i におけるせん断応力 P_i およびせん断速度 V_i が求められる。そして、横軸にせん断応力、縦軸にせん断速度をとり、座標中に (P_i, V_i) 点を打点することにより、図 4 に示す流動曲線が得られる。この流動曲線は(6)式および(7)式で表せることより、図中の直線の傾きの逆数を塑性粘度として算定し、横軸の切片の $3/4$ を降伏値として算定した。

J 型フロー試験により求めたせん断応力 P とせん断速度 V の実験結果の一例を図 5 に示す。このように、J 型フロー試験結果は調合の変化を良く反映している。

2.5 硬化コンクリートの試験

硬化コンクリートの品質に関しては、圧縮強度および乾燥収縮率を測定した。圧縮強度試験は JIS A 1108 に準じ、材齢 4 週および 13 週で行った。乾燥収縮率の測定は、 $10 \times 10 \times 40$ cm の試験体を作成し、JIS A 1129-1 のコンパレータ法により材齢 1 週から測定を開始した。

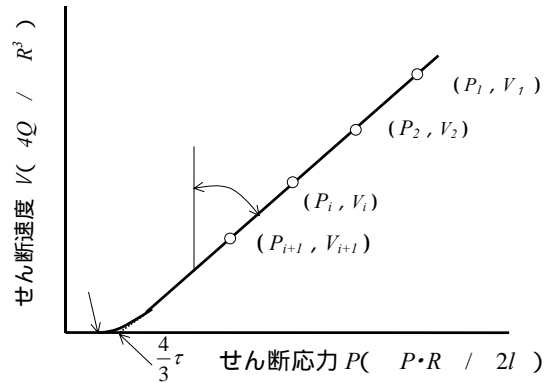


図4 J型フロー試験による流動曲線

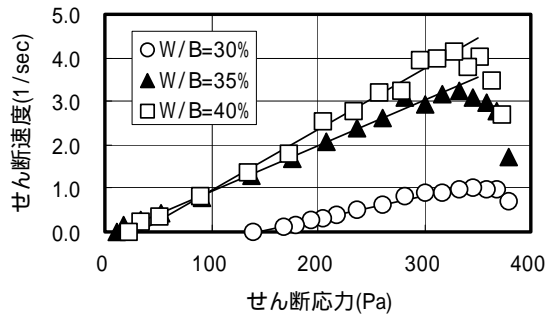


図5 J型フロー試験結果（一例）

3. 調合要因が流動特性に及ぼす影響に関する検討

各調合に対する各試験の結果を表 3 に示した。それぞれの調合要因ごとに流動特性に及ぼす影響について検討した。

3.1 高炉セメント B 種を結合材としたコンクリートの流動特性（実験）

図 6 は実験において、高炉セメント B 種を結合材とした水結合材比 40% のコンクリートについて、高性能 AE 減水剤の添加量と流動特性の関係を示したものである。なお、図中に比較のため普通ポルトランドセメントの結果を併記した。図のように、高炉セメント B 種を用いた場合の塑性粘度は高性能 AE 減水剤量を 1.6% から 1.8% に増加すると、約 30 Pa・s 低下し、これ以上の添加量では 60 ~ 70 Pa・s とほぼ一定の値を示した。これは、高性能 AE 減水剤量がある程度まで

増加するとセメント粒子の分散が著しく大きくなり、ペーストの塑性粘度は低下するが骨材同士の接触時の摩擦抵抗などが大きくなり、せん断応力の変化に対する速度変化の割合は変わらず、塑性粘度はほぼ一定の値を示すものと考えられる。一方、降伏値は、高性能 AE 減水剤量を 1.6% から 1.7% に増加すると、83Pa から 29Pa へと大きく低下し、それ以降は緩やかに低下し、添加量 2.2% で最小値 0 Pa を示した。

また、これらの高炉セメント B 種を用いたコンクリートの塑性粘度および降伏値は、普通ポルトランドセメントの場合に比べ小さい値を示している。高性能 AE 減水剤量が 2.0% において、高炉セメント B 種を用いた場合の塑性粘度は 63Pa・s と適正な粘度を示し、普通ポルトランドセメントに比べ約 50Pa・s 小さい値となった。また、同じく添加量 2.0% において、高炉セメント B 種を用いた場合の降伏値は 25Pa と良好な軟度を示し、普通ポルトランドセメントの 123Pa に比べ 98Pa 小さい値となった。これらは、高炉セメント B 種は普通ポルトランドセメントに比べ、流動性を低下させるセメントの構成化合物である C_3A および C_4AF 量が少なく、また、これら化合物に吸着される高性能 AE 減水剤量が少ないためと考えられる。

以上の結果より、高炉セメント B 種は普通ポルトランドセメントに比べ高性能 AE 減水剤による流動特性の改善効果が大きく、少ない高性能 AE 減水剤の添加量で適正な流動特性が得られることが確認された。また、高炉セメント B 種を用いたコンクリートの塑性粘度は高性能 AE 減水剤量を増加すると低下するが、所定の添加量を超えるとほぼ一定の値を示す。また、降伏値は高性能 AE 減水剤量の増加により著しく低下することが確認された。

3.2 高炉セメント B 種をフライアッシュで置換したコンクリートの流動特性 (実験)

図 7 は実験において、高炉セメント B 種をフライアッシュ 種および 種で 0、10、15、30 および 45% と置換した水結合材比 40%、高性能 AE 減水剤量 1.5% のコンクリートについて、フライアッシュの種類およびその置換率が流動特性に及ぼす効果を示したものである。なお、比較のために普通ポルトランドセメントをフライアッシュ 種で置換した水結合材比 40%、

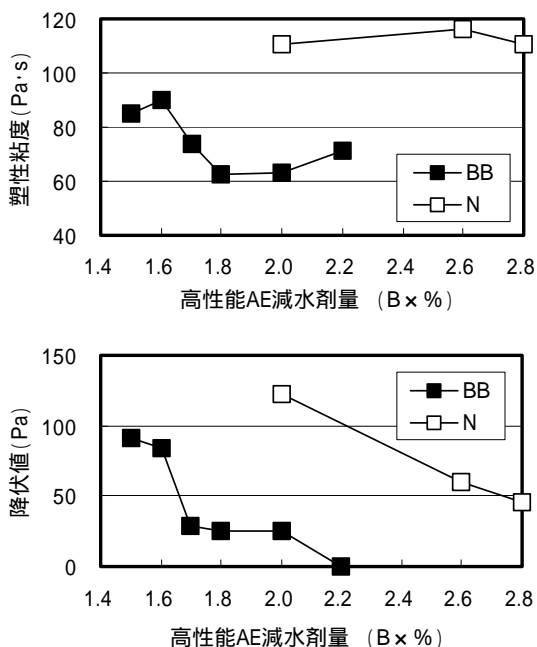


図6 高性能 AE 減水剤量と流動特性
(実験)

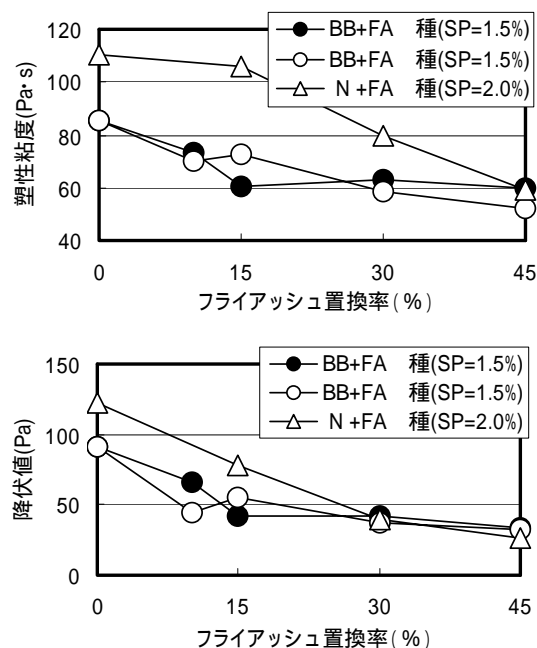


図7 フライアッシュの置換率と流動特性
(実験)

高性能 AE 減水剤量 2.0%のコンクリートの結果を図中に併記した。このように、高炉セメント B 種をフライアッシュ 種および 種で置換したコンクリートの塑性粘度および降伏値は、フライアッシュの置換率を 15%まで増すと大きく低下し、それ以降は置換率の増大に伴い緩やかに低下する傾向を示した。また、これらの値はフライアッシュ 種および 種の間では、ほぼ同じ値を示し、フライアッシュの比表面積の違いによる影響は認められなかった。

また、高炉セメント B 種を用いると、普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べ、フライアッシュ置換率の増大に伴う塑性粘度および降伏値の低下の割合が小さくなる傾向を示した。これは、セメントの一部をフライアッシュで置換すると、結合材中に占める普通ポルトランドセメント量は減少し、それに伴い流動性を低下させる C_3A および C_4AF 量は少なくなる、それらセメント化合物の減少量が高炉セメント B 種のほうが普通ポルトランドセメントに比べ小さいことによるものと考えられる。

以上より、高炉セメント B 種をフライアッシュで置換したコンクリートの流動特性は、フライアッシュ 種または 種を 15%程度置換することにより大きく改善されることおよびフライアッシュの比表面積の影響をあまり受けないことが確認された。

3.3 高炉セメント B 種をフライアッシュ 種で 15%置換したコンクリートの流動特性 (実験)

実験 の結果より、高炉セメント B 種をフライアッシュ 種または 種で 15%程度置換することにより、高炉セメント B 種の場合より流動特性が大きく改善できることが分かった。そこで、実験 では高炉セメント B 種を標準的なフライアッシュであるフライアッシュ 種で 15%置換したコンクリートについて、その他の調合要因が流動特性に及ぼす効果についてより詳細に検討した。調合要因には高性能 AE 減水剤の添加量、分離低減剤の添加量、水結合材比、細骨材結合材比および細骨材率をとりあげた。実験対象としたコンクリートの調合は、単位水量を 182kg/m^3 と一定とし、水結合材比は 40%、細骨材結合材比は 1.6、細骨材率は 45%、分離低減剤量は 0.2%、高性能 AE

減水剤量は 1.7%を基準値とし、それぞれの調合要因について 5 水準変化させた。

(1) 高性能 AE 減水剤の影響

図 8 は高性能 AE 減水剤の添加量と流動特性の関係を示したものである。なお、図中に比較のため、高炉セメント B 種を結合材とした調合の結果を併記した。高炉セメント B 種をフライアッシュ 種で 15%置換したコンクリートの塑性粘度は、高性能 AE 減水剤量の増加に伴い低下し、高性能 AE 減水剤量が 1.5%で約 $70\text{Pa}\cdot\text{s}$ の値に収束し、これ以上の添加量ではほぼ一定の値を示した。降伏値は高性能 AE 減水剤量の増加に伴い大きく低下したが、その低下の割合は高炉セメント B 種の場合よりも小さくなった。また、塑性粘度および降伏値はフライアッシュ 種を 15%置換することにより、高性能 AE 減水剤量が 1.7%以下の少ない添加量において、高炉セメント B 種の場合よりも小さい値を示した。これは、高性能 AE 減水剤量が 1.7%以下と少ない添加量では高炉セメントの分散は十分ではなく、フライアッシュのボールベアリング効果が顕著に現れたものと考えられる。

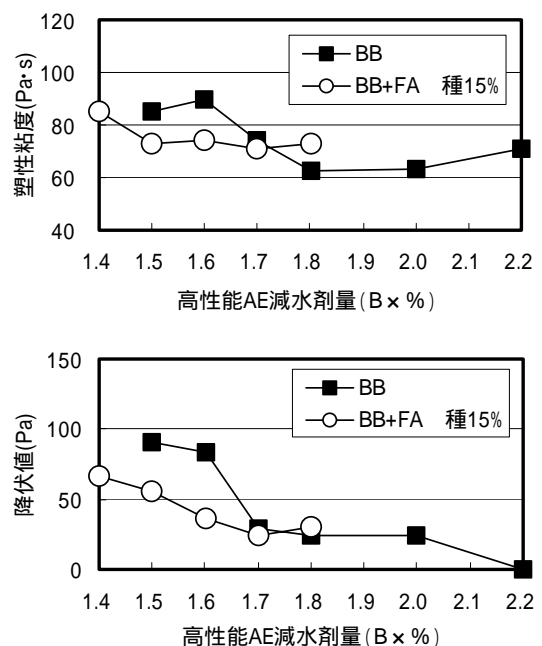


図 8 高性能 AE 減水剤量と流動特性 (実験)

以上のように、高炉セメント B 種をフライアッシュ種で 15% 置換することにより、高性能 AE 減水剤の添加量が少ない条件で塑性粘度および降伏値を高炉セメント B 種の場合より小さくできることが確認された。また、塑性粘度は所定の高性能 AE 減水剤量を超えるとほぼ一定の値となる。降伏値は高性能 AE 減水剤量の増加とともに低下するが、高性能 AE 減水剤が降伏値に及ぼす効果は、高炉セメント B 種の場合に比べ低下することが分かった。

(2) 分離低減剤の影響

図 9 は分離低減剤の添加量と流動特性の関係を示したものである。塑性粘度および降伏値は分離低減剤量が 0.2% までは緩やかに増加し、それ以降急激に増加した。分離低減剤量が 0% ではコンクリートは完全に分離し、0.2% で塑性粘度は約 $70\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、降伏値は約 25Pa と適切な値を示した。以上より、分離低減剤の添加量が所定の値を超えると塑性粘度は著しく大きくなるが、降伏値も大きくなることが確認された。

(3) 水結合材比の影響

図 10 は水結合材比の変化が流動特性に及ぼす効果を示したものである。このように、塑性粘度は水結合材比を 30% から順次大きくすると低下し、40% で $71\text{Pa}\cdot\text{s}$ と適切な粘度を示した。そして、45% で最も小さい値を示し、50% にかけて増加する傾向を示した。降伏値は水結合材比を 30% から 35% に大きくすると著しく低下し、35% で最小値 8Pa を示し、それ以降は直線的に増加した。これは、水結合材比を大きくするとセメントペーストの降伏値は低下する⁷⁾。このため 35% までは低下したものの、単位水量一定の条件で水結合材比を大きくすると、コンクリート中のセメントペースト量は減少するため、コンクリートの降伏値はそれ以降増大したものと思われる。

以上のように、塑性粘度および降伏値は水結合材比の影響を受け、最適な水結合材比が存在する。本実験では、塑性粘度は水結合材比 45% で、降伏値は水結合材比 35% で最も小さい値を示した。また、適切な粘度を有し、且つ、降伏値を低く抑えることができる最適な水結合材比は 40% であった。

(4) 細骨材結合材比の影響

図 11 は単位水量を $182\text{kg}/\text{m}^3$ と一定の条件で、細骨

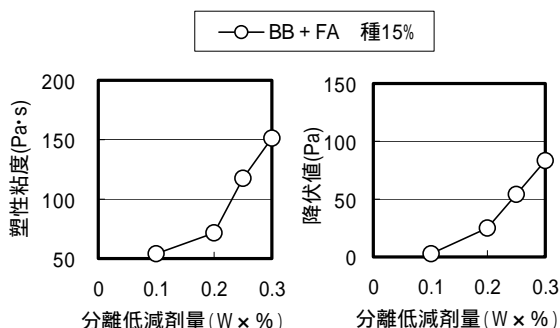


図 9 分離低減剤量と流動特性 (実験)

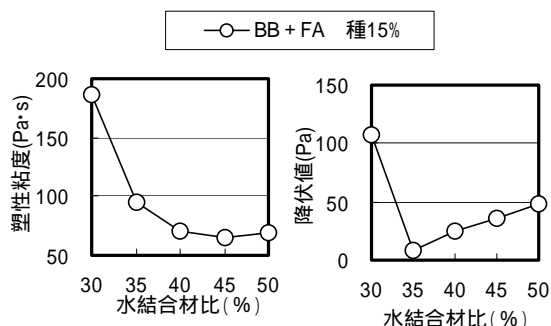


図 10 水結合材比と流動特性 (実験)

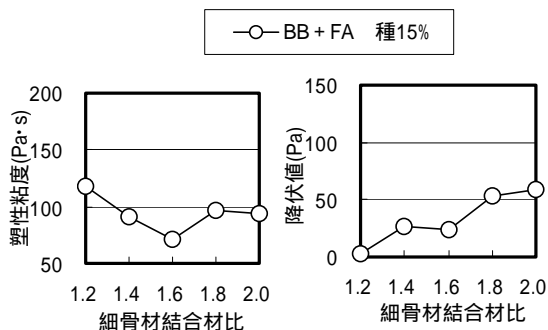


図 11 細骨材結合材比と流動特性 (実験)

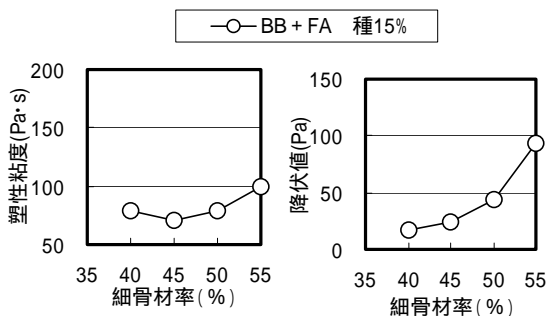


図 12 細骨材率と流動特性 (実験)

材結合材比を 1.2、1.4、1.6、1.8 および 2.0 と変化させたコンクリートについて、細骨材結合材比の効果を示したものである。図のように、塑性粘度は細骨材結合材比が 1.6 で最も小さい値が得られた。また、降伏値は細骨材結合材比の減少に伴い低下し、細骨材結合材比が 1.2 で最も小さい値が得られた。このように、細骨材結合材比によりコンクリートの流動特性は変化し、今回の実験では細骨材結合材比が 1.6 で適切な粘度を有し、且つ、降伏値は小さい値を示した。この細骨材結合材比の値 1.6 は、表面吸着水⁹⁾を考慮した細骨材(表面水率 = 2.5%)の空隙に結合材を充填したときの細骨材結合材比の計算値 1.7 にほぼ一致した。これは、表面水を考慮した細骨材の空隙率および結合材の実積率から、適切な流動特性が得られる細骨材結合材比を算出できる可能性を示唆している。

(5) 細骨材率の影響

図 12 は細骨材率が流動特性に及ぼす効果を示したものである。塑性粘度は細骨材率 45% で最も小さい値が得られた。降伏値は細骨材率の減少に伴い低下し、40% で最も小さい値が得られた。なお、細骨材率 35% では、J 型フロー試験器のコーナー部に粗骨材が閉塞し、コンクリートは流動しなかった。

本実験では、細骨材率が 45% 前後で塑性粘度および降伏値は適正值を示した。この細骨材率は、図 1 に示した細骨材と粗骨材が最大密度となる細骨材率 45% と一致し、最大密度となる細骨材率で良好な流動特性が得られることが確認された。

4. 調合要因が硬化コンクリートの品質に及ぼす影響に関する検討

4.1 圧縮強度

コンクリート試験体は標準養生とし、材齢 4 週および 13 週で圧縮試験を行った。試験結果は表 3 に示したとおりである。

これらの結果から、図 13 に高炉セメント B 種および普通ポルトランドセメントをフライアッシュ 種で置換した水結合材比 40% のコンクリートについて、フライアッシュ 種の置換率と圧縮強度との関係を示す。材齢 4 週における圧縮強度は、フライアッシュ 種の置換率の増加に伴い低下した。これは、普通ポ

ルトランドセメントおよび高炉セメント B 種ともに確認された。また、全ての置換率の水準において、普通ポルトランドセメントを用いたほうが高炉セメント B 種よりも高い値を示した。材齢 13 週における圧縮強度はフライアッシュ 種の置換率が 0 % と 15 % ではあまり差がない値を示し、30%、45% と置換率を増加するに伴い低下した。この傾向は、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種ともに確認された。また、材齢 13 週における圧縮強度は普通ポルトランドセメントを用いたほうが高炉セメント B 種よりも若干高い値を示した。

以上より、高炉セメント B 種をフライアッシュ 種で 15% 置換したコンクリートの圧縮強度は、材齢 13 週において高炉セメント B 種または普通ポルトランドセメントのみを結合材とした場合の圧縮強度とほぼ同じ値が得られることが確認された。

図 14 に水結合材比 40% のコンクリートについて、フライアッシュの置換率と材齢 4 週に対する材齢 13 週の圧縮強度比との関係を示す。フライアッシュの置

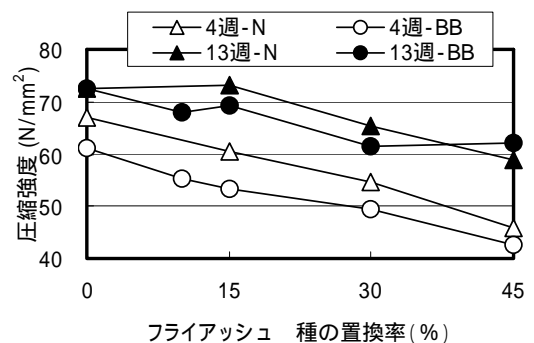


図 13 フライアッシュ 種の置換率と圧縮強度

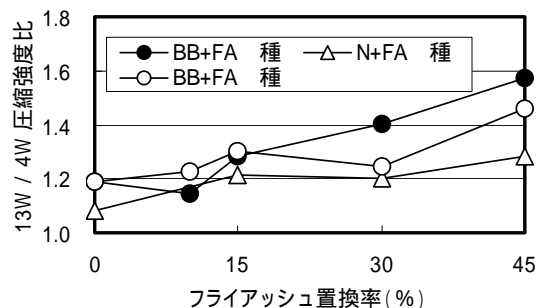


図 14 フライアッシュ置換率と 13W/4W 圧縮強度比

換率の増加に伴い、圧縮強度比は大きくなった。これは、セメントの種類およびフライアッシュの種類にかかわらず確認された。また、フライアッシュ種の置換率を増加すると、高炉セメント B 種を用いたほうが普通ポルトランドセメントよりも圧縮強度比は大きくなる結果が得られた。また、フライアッシュの置換率が 30% および 45% と大きい割合では、フライアッシュ種を用いたほうがフライアッシュ種よりも圧縮強度比は大きくなった。

4.2 乾燥収縮率

乾燥収縮試験の試験体は、試験開始材齢 1 週まで標準養生を行い、以後、温度 20 相対湿度 60% の恒温恒湿室で保存した。

図 15 に水結合材比 40%、単位水量 182kg/m^3 、細骨材率 45% のコンクリートについて、結合材が乾燥収縮率に及ぼす影響を示す。このように、高炉セメント B 種の場合の乾燥収縮率は、普通ポルトランドセメントの場合より小さい値を示した。また、高炉セメント B 種にフライアッシュ種を 15% 置換すると乾燥収縮率は大きくなる傾向を示し、普通ポルトランドセメントの場合とほぼ同じ値を示した。一方、普通ポルトランドセメントにフライアッシュ種を 15% 置換すると乾燥収縮率は逆に小さくなる傾向を示した。結合材の影響については、既往の研究でも指摘されている。高炉スラグ微粉末に関して平石ら¹⁰⁾は、高炉スラグ微粉末をセメント量の 30% 代替させた割合の乾燥収縮率は、無混入に比べ若干大きくなると報告している。また、高炉スラグ微粉末の置換率 30 ~ 50% では無混入コンクリートと同程度であるとの報告¹¹⁾もある。本実験結果は、これら報告と異なる性状を示した。フライアッシュに関して、浮田ら¹²⁾、村井ら¹³⁾は普通ポルトランドセメントにフライアッシュを混入すると、乾燥収縮率は無混入より若干低下すると報告している。本実験結果も、これら報告と同じ性状を示した。

図 16 および図 17 に高炉セメント B 種をフライアッシュ種で 15% 置換した単位水量が 182kg/m^3 のコンクリートについて、水結合材比および細骨材率が乾燥収縮率に及ぼす影響を示す。図 16 に示すように、保存期間 2 週では水結合材比の顕著な影響は見られな

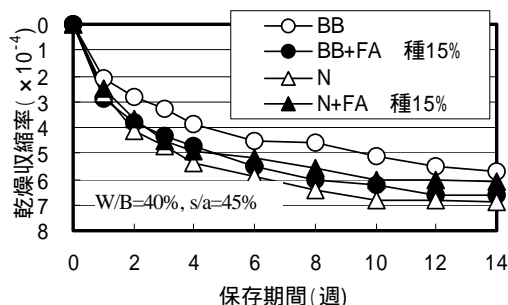


図 15 乾燥収縮試験結果（結合材の影響）

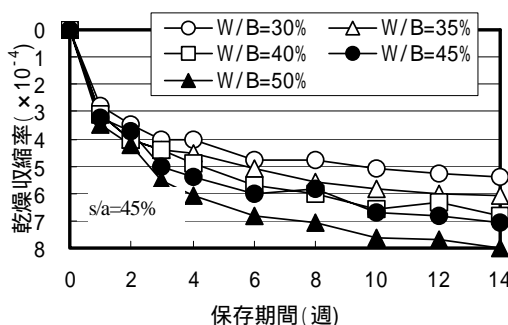


図 16 乾燥収縮試験結果（水結合材比の影響）

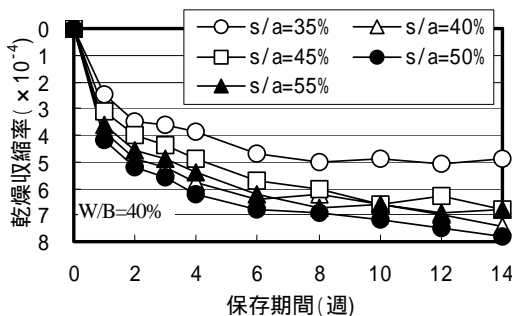


図 17 乾燥収縮試験結果（細骨材率の影響）

いが、保存期間が 3 週以降では水結合材比が大きくなるに伴い、乾燥収縮率は増大した。また、図 17 に示すように細骨材率が大きくなるに伴い、乾燥収縮率は増大する傾向を示した。

5. まとめ

高炉セメント B 種にフライアッシュを使用した高流動コンクリートの流動特性を J 型フロー試験によるレオロジー定数で評価し、調査要因が流動特性に及ぼす影響について検討を行った。また、調査と硬化コンクリートの品質との関係についても検討した。その結

果、本実験の範囲内で以下のことが明らかとなった。

- 1) 高炉セメント B 種を結合材としたコンクリートは、普通セメントを用いた場合に比べ、高性能 A E 減水剤による流動特性の改善効果が大きく、塑性粘度および降伏値は大幅に小さい値となった。
- 2) 高炉セメント B 種をフライアッシュ 種または種で置換したコンクリートの塑性粘度および降伏値は、置換率 15% までは大きく低下するが、それ以上の置換率では効果は小さい。
- 3) 高炉セメント B 種をフライアッシュ 種で 15% 置換すると、無混入のコンクリートに比べ、少ない高性能 A E 減水剤の添加量において塑性粘度および降伏値を低く抑えることができる。
- 4) 塑性粘度および降伏値を小さくできる水結合材比が存在し、前者は 45% で後者は 35% であった。
- 5) 細骨材結合材比が 1.6 において、良好な流動特性が得られた。
- 6) 粗骨材と細骨材が最大密度となる細骨材率において、塑性粘度および降伏値を小さくできる。
- 7) 高炉セメント B 種をフライアッシュ 種で 15% 置換した調合の圧縮強度は、材齢 13 週において高炉セメント B 種または普通ポルトランドセメントを結合材とした場合とほぼ同じ値が得られる。
- 8) 高炉セメント B 種を用いたコンクリートの乾燥収縮率は本実験では最も小さい値となったが、フライアッシュ 種で 15% 置換したコンクリートの乾燥収縮率は、普通ポルトランドセメントを結合材としたコンクリートとほぼ同じ値を示した。
- 4) 寺田謙一、谷川恭雄、森博嗣、黒川善幸、三島直生：フレッシュコンクリートのレオロジー性質に及ぼすせん断層厚さおよび粗骨材要因の影響に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 513 号、pp.15-22、1998.11
- 5) 山本康弘、本間礼人、橘高義典：高流動コンクリートの流動特性の試験方法 (J 型フロー試験) に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 489 号、pp.9-16、1996.11
- 6) 宮本欣明、山本康弘：J 型フロー試験による高流動コンクリートの流動特性・調合に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 547 号、pp.9-15、2001.9
- 7) 宮本欣明、山本康弘：フライアッシュを使用した高流動コンクリートの調合要因が流動特性に及ぼす効果、日本建築学会構造系論文集、第 566 号、pp.7-14、2003.4
- 8) 松岡康訓：超流動コンクリート、コンクリート工学 Vol.31、No3、pp.79-82、1993.3
- 9) 伊東靖朗：細骨材の水と空気による界面状態がコンクリートおよびモルタルに及ぼす影響に関する研究、土木学会論文報告集、第 343 号、pp.229-238、1984.3
- 10) 平石信也、笠井芳夫、飛内圭之、長田浩治：フローイングコンクリートの調合・流動性・強度・耐久性に関する実験研究、日本建築学会構造系論文集、第 467 号、pp.9-18、1995.1
- 11) 日本建築学会編：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート技術の現状、pp.16~17、1992.6
- 12) 浮田和明、石井光裕、重松和男、野尻陽一：分級フライアッシュを混入したコンクリートの基礎物性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10、No.2、pp.1-6、1998
- 13) 村井浩展、石井光裕、枝松良展、小林哲夫：分級フライアッシュを用いた高流動コンクリート、セメント・コンクリート論文集 NO.52、pp.518-523、1998

参考文献

- 1) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針 (案)・同解説、1997.1
- 2) 新藤竹文、松岡康訓、早川光敬：超流動コンクリート (バイオクリート 21) の開発、大成建設技術研究所報第 24 号、1991
- 3) 呉相均、野口貴文、友澤史紀：円柱を用いた高流動コンクリートのレオロジー定数算定方法、日本建築学会構造系論文集、第 518 号、pp.1-8、1999.4