

論文 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に関する研究

本間 礼人*¹・山本 康弘*²

要旨：高性能AE減水剤添加量、水セメント比、分離低減剤添加量、細骨材率、砂セメント比等の調合の変化が、高流動コンクリートのビンガム流体としての流動特性値である粘度係数及び剪断応力降伏値に及ぼす効果について、導管粘度計として開発したJ型フロー試験による定量的な測定結果により比較検討を行った。その結果、各種の調合要因が流動特性値に及ぼす影響を把握するとともに、高流動コンクリートの調合の上では、水セメント比、細骨材率、砂セメント比については、剪断応力降伏値を効果的に低下させるための最適な値が存在することを明らかにした。

キーワード：高流動コンクリート、調合、粘度、剪断応力降伏値、レオロジー

1. はじめに

今日、高流動コンクリートは使用実績も増え、コンクリートの基礎技術のひとつとして普及し定着してゆきつつある。しかしながら、フレッシュな状態の高流動コンクリートに要求される性能については、適切な評価方法が確定されていないのが現状である。これは、フレッシュな状態の高流動コンクリートに要求される性能が、充填性、間隙通過性、材料分離抵抗性など多岐にわたることに加えて、一般に高流動コンクリートのレオロジー特性を物理量として評価することが難しいためであり、高流動コンクリートの試験方法や調合方法を確立するために様々な試みが続けられている。そのため、筆者らはこれまで簡単な器具により、高流動コンクリートのビンガム流体としてのレオロジー定数(粘度係数および剪断応力降伏値)を正確かつ定量的に評価することができるJ型フロー試験を開発し、実験データの蓄積を行ってきた。

本稿では、J型フロー試験器を用いて、高流動コンクリートのレオロジー特性を把握・評価し、高性能AE減水剤の添加量、水セメント比、分離低減剤の添加量、細骨材率、砂セメント比といったコンクリートの調合要因が、流動特性に及ぼす

影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 コンクリートの使用材料と調合

コンクリートの材料は、以下のとおりである。

- ①セメント：普通セメント(比重3.16)
高炉セメントB種(比重3.04)
ビーライトセメント(比重3.23)
- ②細骨材：相模産と君津産の1：4の混合砂
相模川産川砂（表乾比重2.59）
君津産陸砂（表乾比重2.58）
- ③粗骨材：奥多摩産砂岩碎石
（表乾比重2.65、最大寸法20mm）
- ④混和剤：ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
メチルセルロース系分離低減剤
細骨材率については、充填試験の結果、実験Iでは45%とした。

表1に実験Iに使用したコンクリートの調合と性質を示す。水セメント比を37%、40%、45%の3水準とし、各水セメント比について分離低減剤添加量を2水準ないし3水準に設定し、各々の水準に対して高性能AE減水剤の添加量を4水準程度変化させて実験を行った。

*1 福井大学講師 工学部建築建設学科 博士(工学) (正会員)

*2 東京工芸大学非常勤講師 工学部建築学科 工博 (正会員)

表—1 高流動コンクリートの調合と性質(実験Ⅰ)

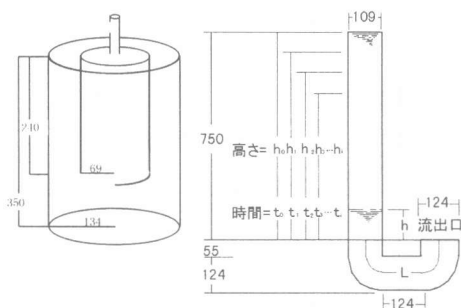
調査 記号	セメント 種類	w/c %	単位量	高性分離	スラ ン プ	SL	外内 骨材比	試験値	強度係 数	4週	13週	13週	総合判 断結果		
			(kg/m ³)	減水率		強度		強度		強度					
			セメント	低減率		値		Pa	Pa・s	N/mm ²	N/mm ²	(13w/4w)			
N-45	普通	45	185	413	2.90	0	25.58	58	1.05	60.8	29.4	57.4	66.5	1.159	分離
NS-45	普通	45	185	413	4.00	0.12	25.65	61.0	1.04	56.9	117.7	70.8	81.0	1.144	良好
N-40	普通	40	175	438	2.98	0	25.1	52.5	—	80.4	21.6	50.9	39.4	0.773	分離
NS-40	普通	40	175	488	6.65	0.20	25.8	57	0.95	47.1	85.3	63.1	87.4	1.384	良好
N-35	普通	35	170	488	3.10	0	23.7	45.5	—	85.3	29.4	55.6	56.9	1.024	分離
NS-35	普通	35	170	530	10.0	0.20	25.6	59.5	1.04	59.8	117.7	58.6	72.2	1.233	良好
N-30	普通	30	159	530	3.19	0	26.2	68	1.18	125.5	41.2	79.4	72.2	0.909	やや分離
N-25	普通	25	144	576	5.33	0	23.7	51.5	—	124.5	376.6	76.8	81.9	1.066	不良
K-45	高炉	45	191	426	1.90	0	25.0	54	1.05	—	—	60.9	64.2	1.055	分離
KS-45	高炉	45	191	426	4.29	0.14	27.0	69.5	1.06	7.8	95.1	74.5	—	—	—
K-40	高炉	40	183	457	2.11	0	27.2	58	1.03	73.5	24.5	58.8	73.4	1.249	分離
KS-40	高炉	40	183	457	3.53	0.20	25.5	59	1.04	46.1	154.9	71.4	84.7	1.187	良好
K-35	高炉	35	175	499	2.41	0	24.3	60	1.28	74.5	26.5	63.8	75.6	1.186	分離
KS-35	高炉	35	175	499	3.03	0.10	26.5	63	1.07	60.8	105.9	77.5	91.9	1.185	良好
K-30	高炉	30	159	530	2.68	0	24.8	59.5	1.08	66.7	73.5	67.0	79.9	1.193	良好
K-25	高炉	25	144	576	3.60	0	27.5	64	1.01	50.0	259.9	77.0	85.0	1.117	良好
K-20	高炉	20	126	632	4.30	0	26.5	60	0.97	37.3	429.5	68.2	92.1	1.350	不良
B-30	B7小	30	162	539	1.99	0	25.3	59.5	1.12	60.8	46.1	69.1	79.5	1.151	やや分離
B-25	B7小	25	149	596	2.82	0	23.0	59.5	1.19	59.8	94.1	71.1	91.8	1.291	良好
B-20	B7小	20	131	655	4.39	0	25.9	59.5	0.97	147.1	744.3	84.9	112.4	1.324	不良

2.2 フレッシュ コンクリートの試験

(1) J型フロー試験

I型フロー試験

器は図-1(b)に示すような導管粘度計である。試験器にコンクリートを充填し、圧力差で流出する時間を10cmごとに測定するとともに、流出が停止した時の試料の流出口との高



(a) 回転粘度計 (b) J型フロート試験器

図-1 流動性試験装置図

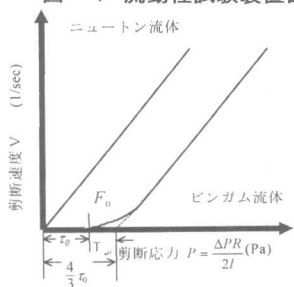
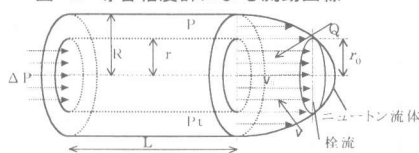


図-2 導管粘度計による流動曲線



- | | | | |
|------------|--------------------------------------|--------------|---------------------------------------|
| Q : | 流量 (cm^3/sec), | ΔP : | 駆動圧 (Pa) |
| R : | 導管の半径 (cm), | r : | 位置の半径 (cm) |
| V : | 剪断速度 ($1/\text{sec}$), | v : | r の位置の流速 (cm/sec) |
| τ : | 粘り係数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), | v_0 : | 中心部の速さ (cm/sec) |
| τ_0 : | 剪断応力降下直値 (Pa), | L : | 導管の長さ (cm) |
| ρ : | コンクリート密度 (g/cm^3), | r_0 : | 栓流半径 (cm) |
| P : | 半径 R のときの剪断応力 (Pa) | | |
| | 半径 r のときの剪断応力 (Pa) | | |

図—3 導管内の流体の構造モデル

低差を測定することにより、ビンガム流体とみなせる範囲内のコンクリートで、骨材同士のフリクションなどを含んだ粘度係数や剪断応力降伏値を測定することができる。

導管中のニュートン流体に駆動圧 ΔP が作用する場合、導管内部の力の釣り合い ($\pi r^2 \Delta P = 2 \pi r l P_t$) から式 (1) が成立する。

$$r=R \text{ とすると } P=\Delta P R / 2 l \quad (1)$$

次に剪断応力 P_t は、剪断速度に比例する為、

$P_t = \lambda \cdot d v / dr$ であり、また $P_t = \Delta P r / 2 l$ であるので $dv / dr = \Delta P r / 2 l \lambda$ と変形できる。

$$r=R \text{ とすると } V=\Delta P R / 2 l \lambda \quad (2)$$

これを積分すると流体量 Q となり、Hagen-Poiseuilleの法則が得られる。

$$Q = \pi R^4 \Delta P / 8 l \lambda \quad (3)$$

式(1), (2), (3)より,

$$V = 4Q/\pi R^3 \text{ となり } P = V\lambda \quad (4)$$

Vは剪断速度(1/sec)であり、Pは剪断応力(Pa)、 λ は粘度係数(Pa・s)である。

またビンガム流体では、図-3のように微小部分で栓流を形成し、Buchingham-Reinerの式が成立する。

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8l\lambda} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{2l}{\Delta P R} \tau_0 + \frac{1}{3} \left(\frac{2l\tau_0}{\Delta P R} \right)^4 \right] \quad (5)$$

これに式(1)、(2)を代入して式(6)を得る。

$$P = V\lambda + \frac{4}{3}\tau_0 - \frac{1}{3}\left(\frac{\tau_0}{P}\right)^3\tau_0 \quad (6)$$

V が0に近い時、 P は τ_0 に近づくため、 τ_0/P は1に近づき式(6)は以下になる。

$$P = V\lambda + \tau_0 \quad (7)$$

J型フロー試験では停止時のコンクリートの高さの差から $V=0$ の時の P 、即ち F_0 を式(8)により算定している。

$$F_0 = R\rho h / 2(L+h) \quad (8)$$

また、 $V=0$ の時 $F=P=\tau_0$ となる。 τ_0 が求まれば、 λ は式(7)、(8)、及び以下に示す式(9)、(10)より算定できる。

$$P - \tau_0 = \frac{\Delta PR}{2l} = \frac{\rho \cdot (h_{i-1} + h_i) / 2 \cdot R}{L + (h_{i-1} + h_i) / 2} \cdot \frac{R}{2} \quad (9)$$

$$V = 4Q / \pi R^3 = 4(h_{i-1} - h_i) / t_i R \quad (10)$$

ここで、 t_i 、 h_i はそれぞれJ型フロー試験における区間*i*のコンクリートの流下時間(sec)、及び区間*i*の高さ(cm)である。

(2) 回転粘度計試験

外円筒回転型の回転粘度計を使用した。装置の概要を図-1(a)に示す。コンクリート充填後、外円筒を速度変化させながら回転させ、その時の応力を記録した。

(3) 外内粗骨材比試験

分離抵抗性の検証の為行った試験である。スランプフロー終了後、端部および中央部からコンクリートを1kgずつ採取し、そこに含まれる5mm以上の粗骨材の重量比率を外内粗骨材比とした。

(4) 目視による観察

スランプフロー試験時の流動性状、水の浮きおよびJ型フロー試験時の流出性状などを目視により観察した。

2.3 圧縮強度試験

標準養生したΦ10x20cmの供試体により行い、4週強度と13週強度およびその比を求めた。

これらの試験および目視による観察によって総合的な流動性判定を行い、表-1の右側に記した。

2.4 コンクリートの練り混ぜ

コンクリートの練り混ぜには、容量50リットルのパン型ミキサを使用し、練り混ぜ量を30リットルとした。練り混ぜ方法は、分割練り工法により、以下に示す手順で行なった。(細骨材+1次水) 60秒→(セメント) 120秒→(AE剤+2次水) 120秒→(高性能AE減水剤) 120秒→(粗骨材) 120秒

3. 実験 I における結果および考察

図-4は実験Iのコンクリートの流動性試験の結果を横軸に剪断応力、縦軸に剪断速度をとつ

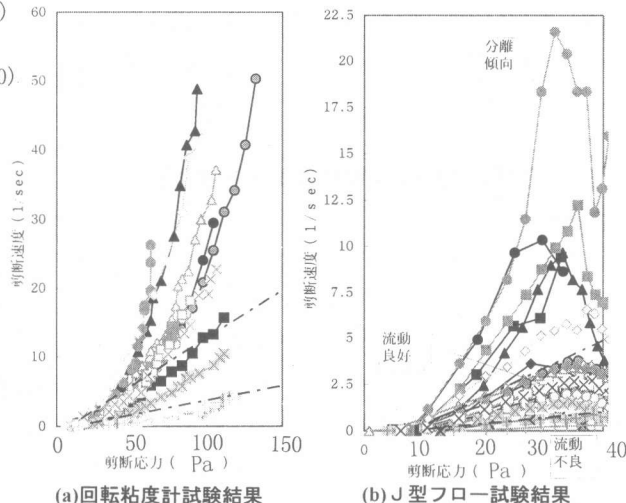


図-4 流動性試験結果

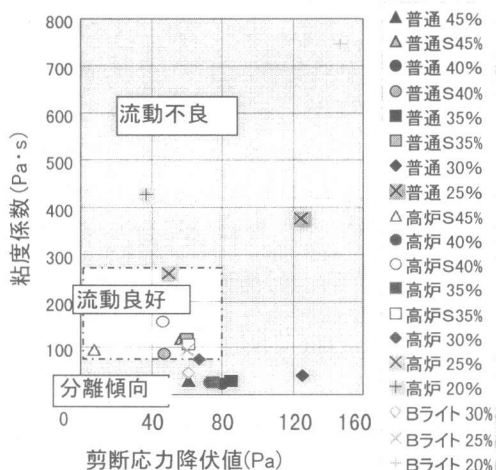


図-5 流動特性相関図

て図示したものである。回転粘度計試験の結果と、J型フロー試験の結果とを比較すると、各コンクリートの流動特性はほとんど同じ傾向を示しているが、J型フロー試験では実用的な、より低い剪断速度域での流動特性が得られていることがわかる。

また、いくつかの調合では13週強度比で1.1未満と長期強度の伸びが低い、スランプフロー試験や外内粗骨材比試験の値は明確な関連が得られなかった。しかし、図-5に示すように粘度係数と剪断応力降伏値の双方を考慮した場合、剪断応力降伏値は80Pa以下、粘度係数は75~275Pa・sの範囲の内外でこれらのコンクリートを選別することができる。これらの強度発現性状及び総合的流動性判定から見て、上記のレオロジー定数の範囲内のコンクリートが高流動コンクリートとして適切であることがわかる。

4. 調合要因の変化が流動特性に及ぼす影響について

これまでの実験により、J型フロー試験器によって高流動コンクリートの流動特性を数値的に把握でき、高流動コンクリートとしてのその適正範囲を知ることができた。次に、調合要因の変化が、高流動コンクリートの流動特性に及ぼす影響を把握するため実験Ⅱを行った。

表-2に実験Ⅱに使用したコンクリートの調合と性質を示す。実験2では、水セメント比を40%に固定し、細骨材率についてはこのロットで最密充填状態を示した50%を中心として、45%、50%、55%に変化させた場合について実験を行った。そのほか、砂セメント比を1.75、1.91、2.08（単位水量185、175、165 kg/m³）に変化させた場合についても実験を行った。なお、コンクリートの空気量は、4.5±1.5%になるように調整した。

また、実験Ⅱのコンクリートに対してJ型フロー試験を行い、その結果を表-2の右側に示した。

5. 実験Ⅱにおける結果および考察

5.1 剪断応力降伏値

(1) 高性能AE減水剤の影響及び砂セメント

表-2 コンクリートの調合と性質(実験Ⅱ)

実験	W/C	S/a	S/C	単位量 (kg/m ³)		分離 低減 剤量 %cwt	高性能AE 剤量 %cwt	粘度 係数 Pa・s	剪断 応力 値 Pa
				セメント	水				
Ⅱ	40	45	1.58	463	185	0.12	1.6	40.2	39.0
							1.8	39.7	32.8
							1.9	42.5	31.7
							2.1	39.8	19.1
							2.2	41.2	19.1
							2.4	37.3	19.0
							1.5	48.8	81.4
							1.7	31.8	32.4
							1.8	35.0	18.3
							2.0	31.9	18.7
	40	50	1.76	463	185	0.12	2.2	17.3	19.6
							2.3	30.0	4.5
							1.8	37.2	90.5
							2.0	36.9	80.5
							2.2	24.3	19.4
							2.5	20.1	19.6
							2.7	32.1	19.8
							2.9	26.3	19.1
							3.0	38.0	18.9
							3.2	30.3	4.6
	40	55	1.91	438	175	0.12	1.7	56.3	69.2
							1.8	55.6	31.3
							1.9	38.1	18.7
							2.0	53.1	4.3
							2.2	33.7	4.4
			2.08	413	165	0.12	2.2	80.0	18.7
							2.5	77.3	11.9
							2.8	81.3	4.5
							2.0	61.2	59.6
							2.1	93.8	32.3
							2.4	50.5	18.5
							2.7	48.2	4.5

比の影響

図-6は、高性能AE減水剤の添加量の変化がコンクリートの剪断応力降伏値に及ぼす効果の一例を、水セメント比45%の高流動コンクリートについて示したものである。このように剪断応力降伏値は、高性能AE減水剤の添加量を増加していくと順次低下し、0に近づく。これは、一定量以上の添加で骨材の分離を起こしている為と考えられる。即ち、今回の実験で、粘度係数100以下のものでは、高性能AE減水剤と剪断応力降伏値の関係のグラフは右下がり曲線を描いており、この曲線は図-6のように高性能AE減水剤の添加量がおおむね3.5%の軸をもつ2次曲線の左弦として(11)式のように表せる。

$$\tau = A(X - 3.5)^2 \quad (11)$$

ここで τ は剪断応力降伏値 (Pa)、 X : 高性能AE減水剤量 (Cwt%) である。

図-7は S/Cと式(11)の関係を表している。この係数Aの値はS/C=1.76の時0.081、S/C=1.91の時0.069、S/C=2.08の時0.114と、砂セメント比によって変化しており、S/Cが1.9付近で最小となっている。このことから高流動コンクリートには、最適な砂セメント比があると考えられ、今回の実験では最適なS/Cは1.9であった。

(2) 分離低減剤の影響

図-8は分離低減剤の影響を表したものである。先と同様、高性能AE減水剤の添加率3.5%近傍を軸とする、式(12)に示す2次曲線で表すことができる。

$$\tau = B(X - 3.5)^2 \quad (12)$$

また図-9は式(12)の係数Bと分離低減剤の関係を示したもので、高性能AE減水剤添加量が同じである場合、剪断応力降伏値は分離低減剤添加量にあまり左右されないことを示している。

(3) 細骨材率の影響

図-10は細骨材率の影響を表したものである。先と同様、高性能AE減水剤の添加率3.5%近傍を軸とする、式(13)に示す2次曲線で表すことができる。

$$\tau = C(X - 3.5)^2 \quad (13)$$

また図-11は式(13)の係数Cと細骨材率の関係を示したもので、これより細骨材率50%で剪断応力降伏値は最小となる。

4.2 粘度係数

(1) 高性能AE減水剤の影響及び砂セメント比の影響

図-12に、砂セメント比が異なるコンクリートの高性能AE減水剤の添加量と粘度係数の関係を示した。先と同様、いずれの水セメント比においても高流動コンクリートの粘度係数は高性能AE減水剤の添加量の増加に伴い、低くなっている。

このように、高性能AE減水剤の添加量の増大に伴い粘度係数が低下するのは、添加量の増大により、コンクリート中のセメント粒子の分散が促進されることによるが、添加量が過大になると、細骨材や粗骨材の分離が生じる。この場合、回転粘

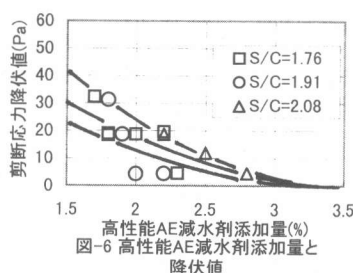


図-6 高性能AE減水剤添加量と降伏値

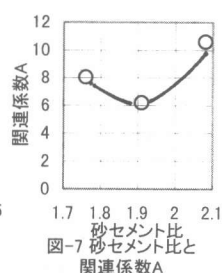


図-7 砂セメント比と関連係数A

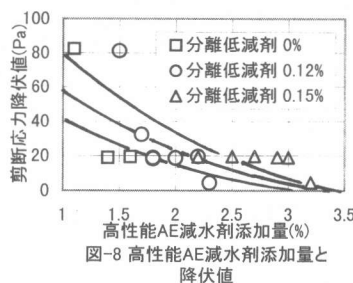


図-8 高性能AE減水剤添加量と降伏値

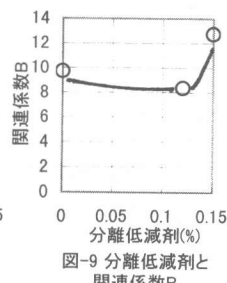


図-9 分離低減剤と関連係数B

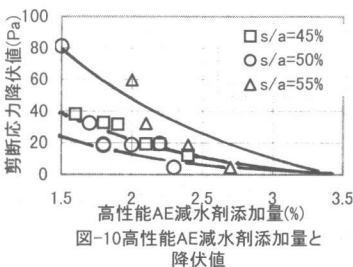


図-10 高性能AE減水剤添加量と降伏値

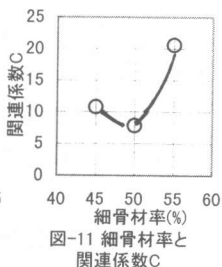


図-11 細骨材率と関連係数C

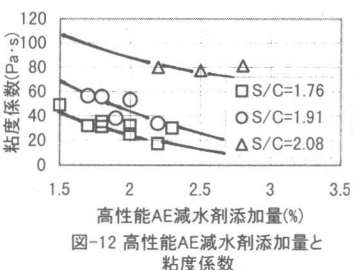


図-12 高性能AE減水剤添加量と粘度係数

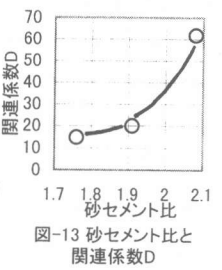


図-13 砂セメント比と関連係数D

度計などでは容器の下部に骨材が沈降し、上部は骨材が少なくなるため、見かけ上の粘度係数は徐々に下がり、一定の値に収束する傾向があると思われる。しかしJ型フロー試験では、材料分離が生じたコンクリートでは、導管の下部に骨材が沈降し流動を妨げるため、見かけの粘度係数は大きくなる。このため高性能AE減水剤の添加量とJ型フロー試験で評価される粘度係数との関係は、3.5%近傍を対称軸とする下に凸の曲線で表わされると考えられ、高性能AE減水剤の添加率3.5%を軸とす

る式(14)に示す2次曲線で表すことができる。

$$\lambda = D_1 (X - 3.5)^2 + D_2 \quad (14)$$

ここに、 λ は粘度係数(Pa·s)、 X は高性能AE減水剤の添加量である。これらの係数 D_1 は $S/C=1.76$ の時 $D_1=0.15$ 、 $S/C=1.91$ の時 $D_1=0.21$ 、 $S/C=2.08$ の時 $D_1=0.66$ となった。

また、図-13は砂セメント比と(14)式の係数 D_1 との関係を表している。 D_1 は $S/C=2.08$ の時には極端に大きくなっており、粘度係数を適切な値とするために砂セメント比は D_1 がほぼ一定となる1.9以下にすることが望ましい。

(2) 分離低減剤

図-14に分離低減剤の影響を表した。先と同様、高性能AE減水剤の添加率3.5%を軸とする2次曲線の左弦として式(15)のように表すことができる。

$$\lambda = E_1 (X - 3.5)^2 + E_2 \quad (15)$$

図-15は式(15)の係数 E_1 と分離低減剤添加量との関係を示したもので、高性能AE減水剤の添加量と同じである場合には、分離低減剤の添加量が多いコンクリートの粘度係数の方が大きくなった。

(3) 細骨材率の影響

図-16に細骨材率の影響を表した。先と同様、高性能AE減水剤の添加率3.5%を軸とする2次曲線の左弦として式(16)のように表すことができる。

$$\lambda = F_1 (X - 3.5)^2 + F_2 \quad (16)$$

また図-17は式(16)の係数 F_1 と細骨材率との関係を示したもので、本研究では細骨材率50%が最適だったといえる。

5 結論

本研究の結果をまとめると今回の実験で得られた範囲内で以下になる。

- (1) J型フロー試験により、ビンガム流体であるコンクリートの粘度係数と剪断応力降伏値を得ることができる。
- (2) J型フロー試験は、回転粘度計に比べて剪断速度の小さい領域で正確に流動特性を測定できる。
- (3) 高流動コンクリートとして適切な流動特性値の範囲は、剪断応力降伏値は80 Pa以下、粘度係

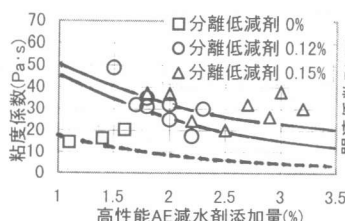


図-14 高性能AE減水剤添加量と粘度係数

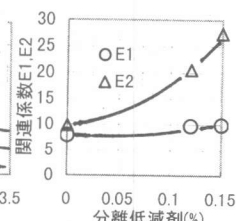


図-15 分離低減剤と関係係数E

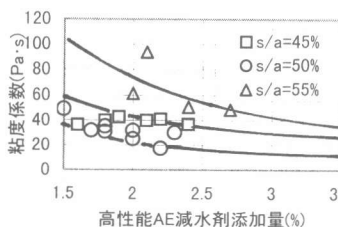


図-16 高性能AE減水剤添加量と粘度係数

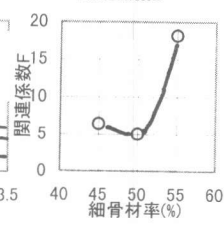


図-17 細骨材率と関係係数F

数は75~275 Pa·sの範囲となった。

(4) 剪断応力降伏値は高性能AE減水剤3.5%を中心軸とする2次曲線の左弦として表すことができる。

(5) 剪断応力降伏値は砂セメント比1.9の時最小となる。

(6) 剪断応力降伏値は分離低減剤の添加量にあまり影響を受けない。

(7) 剪断応力降伏値は最密充填となる細骨材率の時、最も小さくなる。

(8) 粘度係数は高性能AE減水剤添加量3.5%を中心軸とする2次曲線で表すことができる。またこれらの曲線の係数は、分離低減剤の添加量、砂セメント比と関連が見られた。

謝辞 本稿は、許啓文、甕隆文、河野一義、

各氏の卒業研究をもとに、元東京都立大学助手 小野山貫造氏の協力でとりまとめたものです。各氏のご協力に対して心より謝意を表わす次第です。また、小野山氏は昨年2月、33歳の若さで急逝されました。ここに謹んでご冥福をお祈り致します。

参考文献

本稿の一部は参考文献 1)として既発表である。

- 1) 山本康弘, 小野山貫造, 本間礼人, 許啓文: 高流動コンクリートの流動特性と充填性およびコンクリートの品質に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集 第523号 pp. 25-31, 1999. 9