

# フライアッシュを用いた高流動コンクリートの開発

## STUDY ON SUPER WORKABLE CONCRETE CONTAINING FLY-ASH

鳥羽瀬孝臣\*・渡部晃弘\*\*・大曽根哲男\*\*\*

by Takaomi TOBASE, Teruhiro WATANABE and Teruo OSONE

### 1. まえがき

コンクリートが耐久であるためには、配合設計はもとより施工時の確実な打設充填が必要不可欠である。一方、様々なニーズに対応するべくコンクリート構造物は、過密配筋や狭隘型枠などの厳しい施工条件を要求され、打設充填時の締固め作業は困難さを伴うことが多い。このような構造物に対し「締固め不要」をコンセプトとする新しいコンクリートを開発適用しようとする試みがなされている。<sup>1)</sup>

我々は、電気事業者として石炭灰を有効利用する立場から、フライアッシュを混和した「締固め不要」コンクリートの研究を進めてきた。これを、フライアッシュを用いた高流動コンクリート (FEC: Fly-ash Enriched super workable Concrete) と呼び、これまでに配合設計ならびにポンプ施工に関わる研究開発を行ってきたので、その成果の一部を紹介したい。

### 2. FECの特徴

「締固め不要」コンクリートとは、図1に示すようにフレッシュ時に流動性と材料分離抵抗性が適度にバランスし自己充填性能<sup>1)</sup>を有したものであり、一般には「高流動コンクリート」と呼ばれている。(高流動コンクリートのスランプフロー試験の様子を写真1に示す。)

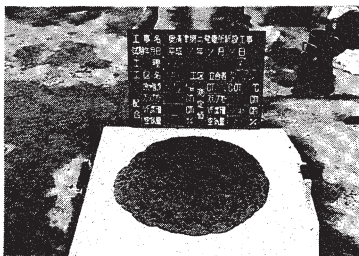


写真1 スランプフロー試験

フレッシュコンクリートのレオロジー<sup>2)</sup>に関して、図2に示すように高流動コンクリートは普通コンクリートに比べ、降伏値が小さく、塑性粘度が大きという性質がある。レオロジーとワーカビリティとの関係は概ね次のように理解できよう。

(レオロジー) (ワーカビリティ)

降伏値小 ⇒ 高流動性

塑性粘度大 ⇒ 材料不分離性

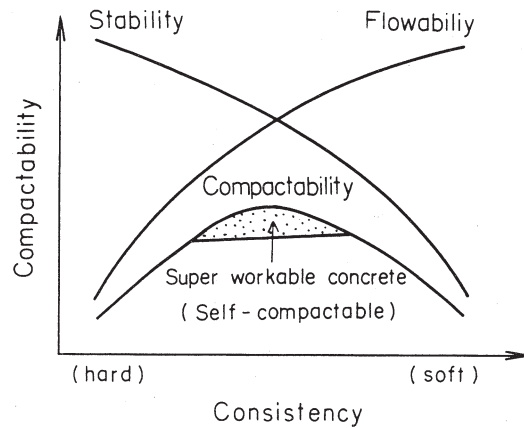


図1 フレッシュコンクリートの性状

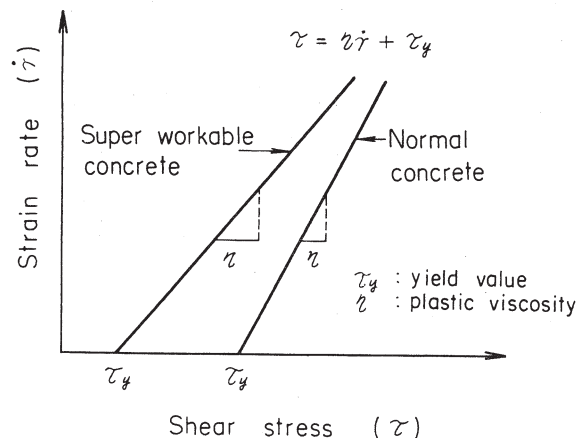


図2 フレッシュコンクリートのレオロジー

\* 電源開発(株)建設部設計室 課長代理 (〒104 東京都中央区銀座6-15-1)

\*\* (株)石炭利用総合センター 技術開発部 調査役 (〒169 東京都新宿区大久保2-3-4)

\*\*\* (株)開発土木コンサルタント技術研究所 部長代理 (〒253 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-35)

このような高流動コンクリートの製造方法は、流動性を与えるために粉体粒子の分散作用のある高性能減水剤を用い、また材料分離抵抗性を与える方法として表1に示す①粉体系、②増粘系、③併用系の大きく3つのタイ

プに分類されている。

表1 高流動コンクリートの分類

タイプ	粉体量 (kg/m <sup>3</sup> )	水粉体比 (%)	増粘剤
粉体系	500~600	30~35	なし
増粘系	300~400	40~60	多量
併用系	400~500	30~40	少量

FECは、粉体としてセメントとフライアッシュを用い、更に品質安定性を得るため少量の増粘剤を加える配合としていることから、併用系のタイプに属するものである。FECの特徴は次のように整理される。

#### 1) フレッシュ時

- 長所：フライアッシュ（表面が滑らかな球形粒子）のベアリング効果により、流動性能を保持したまま単位水量を低減できる。
- 短所：フライアッシュ中の未燃炭素が高性能減水剤を吸着する性質があり、コンクリートの品質性状が変動しやすい。

#### 2) 硬化後

- 長所：水和熱によるマスコンクリートの温度上昇を抑制できる。
- 短所：初期強度は低い。（ポズラン反応により長期強度は増進する。）

### 3. FECの配合設計

#### 3.1 高性能減水剤の選定

良質なFECを製造するために、高性能減水剤には次の性能が要求される。

- ①少ない添加量で十分な流動性を与えること。
- ②フライアッシュの品質バラツキに対し、添加量の変動幅が小さいこと。
- ③未燃炭素による吸着が少ないこと。
- ④空気連行が過剰にならないこと。
- ⑤凝結時間があまり遅延しないこと。
- ⑥流動性（スランプフロー）を90分程度以上保持できること。
- ⑦硬化後の強度、耐久性に悪影響を与えないこと。

上記7項目の性能指標について、任意のフライアッシュに対する高性能減水剤の適合性をモルタル試験により調べた。その結果を表2に示す。

高性能減水剤は、現在市販されている代表的な4種（アミノスルホン酸系、ナフタレン系、ポリカルボン酸系、メラミン系）を用い、フライアッシュは任意の5試料（国内炭2試料、海外炭3試料）を用いた。

表2 高性能減水剤の性能比較

性能指標	アミノスルホン酸系	ナフタレン系	ポリカルボン酸系	メラミン系
添加量	○	○	◎	△
添加量変動	○	○	○	○
未燃分吸着	○	○	◎	○
空気連行	○	○	△	○
凝結時間	○	○	○	○
流動性保持	○	△	○	△
硬化強度	○	○	△	○

表2の結果を補足すると次のとおりである。

- ①ポリカルボン酸系は未燃炭素によって吸着される量が少なく、その結果所定の流動性を得るのに添加量が少なくすむという優れた性能を有する。しかし、あるフライアッシュに対し空気連行量が多くなる等の強度的な不安要素が認められた。
- ②ナフタレン系、メラミン系は、流動性（スランプフロー）の保持時間が短い等の欠点が明らかであった。
- ③アミノスルホン酸系は、性能指標に対して最も欠点が少なくバランスが良かった。

以上の結果から、FECに使用する高性能減水剤として、現状ではアミノスルホン酸系が最適と考えられる。しかし、ポリカルボン酸系についても、その高い流動性を発揮させる分散効果は魅力的であり、今後空気連行を抑制する方策を含めて、より前進的な適用方法を検討する予定である。

#### 3.2 配合試験

FECの配合検討において、自己充填性能を発揮（流動性と材料分離抵抗性のバランスした状態）させる最適粘性を把握することを目的とした配合試験を行った。

配合試験の使用材料を表3に示す。

表3 配合試験におけるFECの使用材料

材 料	種 類	備 考
セメント	普通ポルトランド	比重3.15、比表面積3340cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ	磯子火力（国内炭）	比重2.17、比表面積3042cm <sup>2</sup> /g
	竹原火力（海外炭）	比重2.24、比表面積3920cm <sup>2</sup> /g
	松島火力（海外炭）	比重2.26、比表面積3930cm <sup>2</sup> /g
	松浦火力（海外炭）	比重2.27、比表面積3757cm <sup>2</sup> /g
細骨材	大井川産	比重2.62、粗粒率2.80
粗骨材	相模川産	比重2.67
混和剤	高性能減水剤（SP）	アミノスルホン酸系（標準型）
	増粘剤（AD）	アクリル系
水	水道水	茅ヶ崎市

(1) 単位水量及び高性能減水剤添加量の検討 (モルタル試験)

モルタルフローが  $260 \pm 10\text{mm}$  となるように単位水量及び高性能減水剤添加量を組合せたモルタル試料のロート通過時間を図3に示す。(モルタルロート試験器を写真2に示す。)ここで、粉体はセメントと各種フライアッシュを重量比1:1で配合した。

図3から、モルタルフローを  $260 \pm 10\text{mm}$  とするため、単位水量を少なく高性能減水剤を多く添加した場合にはロート通過時間は長くなり、また逆に単位水量を多く高性能減水剤を少なく添加した場合にはロート通過時間は短くなっている。つまり、一定のモルタルフローを得るための単位水量及び高性能減水剤添加量の組合せは無限に存在するが、これにロート通過時間の条件を与えることにより、その組合せを特定することが可能となる。

次に、モルタルのロート通過時間とブリーディング率の関係を図4に示す。

図4から、モルタルのロート通過時間で10秒前後が最もブリーディング率の小さいことが判る。このメカニズムについて、ロート通過時間が10秒より大幅に長い場合には高性能減水剤を多く必要とするため、その分散効果の効きすぎによる材料分離が発生し、また逆にロート通過時間が10秒より大幅に短い場合には単位水量過多による材料分離が生じているものと考えられる。

以上の検討から、材料分離を抑制するという観点から、モルタル試験によってロート通過時間が10秒前後となる単位水量及び高性能減水剤の組合せが最適な粘性を与える配合であると考えられる。

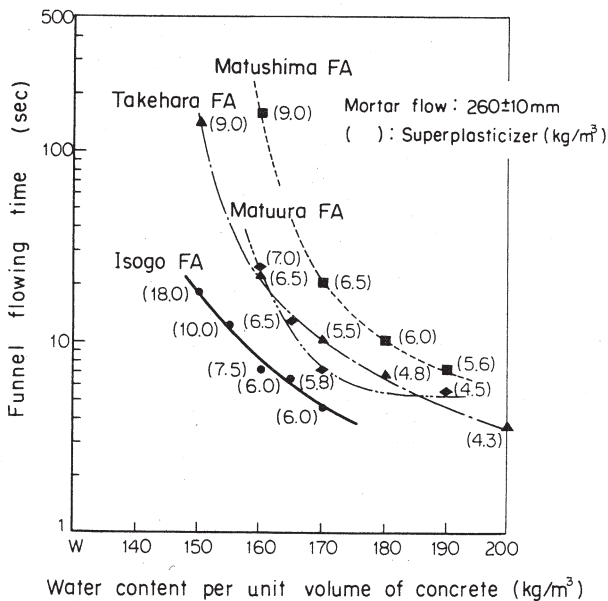


図3 単位水量および高性能減水剤添加量とロート通過時間との関係 (モルタル試験)

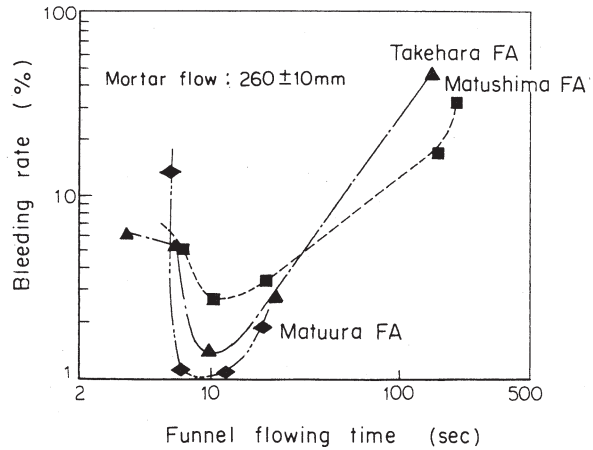


図4 ロート通過時間とブリーディング率との関係 (モルタル試験)

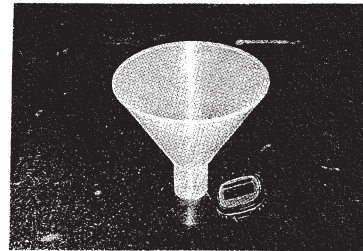


写真2 モルタルロート試験器

(2) 単位粉体量の検討 (コンクリート試験)

単位粉体量をパラメータにFEC (コンクリート) のスランプフロー、ロート通過時間、最初から粗骨材を入れないモルタルとコンクリートから粗骨材をウェットスクリーニングしたモルタルのフロー差を図5に示す。(コンクリートロート試験器を写真3に示す。)

図5から、モルタルのフロー差が極小となる単位粉体量の領域が存在することが判る。このことは、FECのペースト分が粗骨材に付着するため、粗骨材をウェットスクリーニングした後のモルタルはペースト分が減少しており、その残存ペースト量の多少によって図5の結果となっているものと考えられる。つまり、モルタルのフロー差が小さいことは、残存ペースト量が十分に保たれており、適度の流動性と粘性を与える単位粉体量であると考えられる。しかし、単位粉体量が少なすぎる場合には、ウェットスクリーニングしたモルタルの残存ペースト量が少なくモルタルとしての流動性を失う。また、単位粉体量が多すぎる場合には、ペーストの粘性が増加するため、図6に示すような粗骨材の表面にペースト分の多いモルタル膜が厚く形成され、フリーなペーストが減少するようになり、結果としてウェットスクリーニングしたモルタルは残存ペースト量が少なく流動性を失う。

F E C のロート通過時間は、モルタルのフロー差とほぼ同様の領域で極小（概ね20秒前後）となっており、そのときの単位粉体量は概ね 450~500kg/m<sup>3</sup>程度であった。

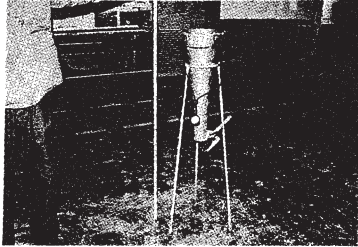


写真3 コンクリートロート試験器

Survive cement paste

(rich) (poor)

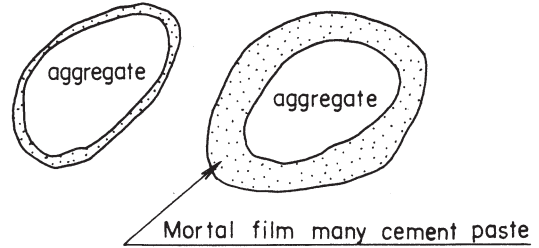


図6 粗骨材表面のモルタル膜

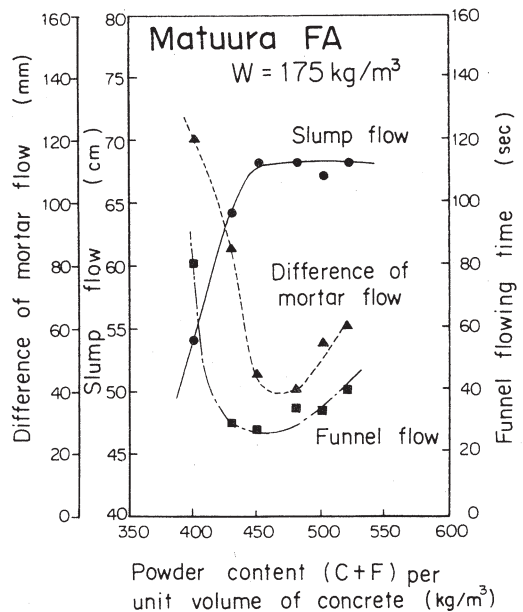
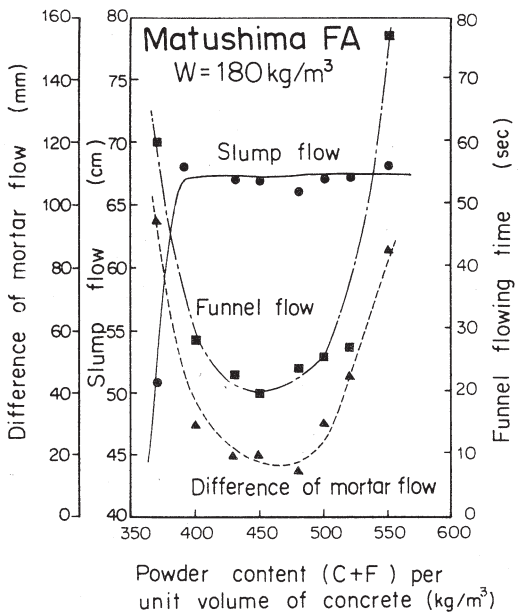
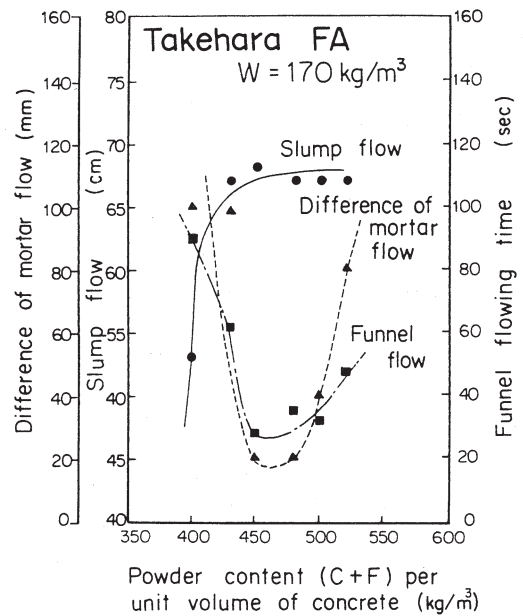
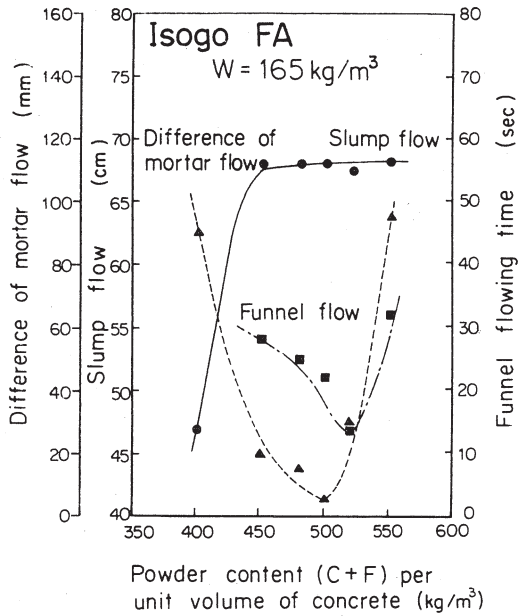


図5 単位粉体量とモルタルフロー差およびロート通過時間との関係（コンクリート試験）

3.3 配合設計の手順

3.2 配合試験の結果に基づき、F E Cの配合設計を図7に示す手順で行うことを提案する。本手順は、配合の大枠を簡便なモルタル試験によって得るものであり、フライアッシュの品質変動に対しても敏速に対応可能となるものである。

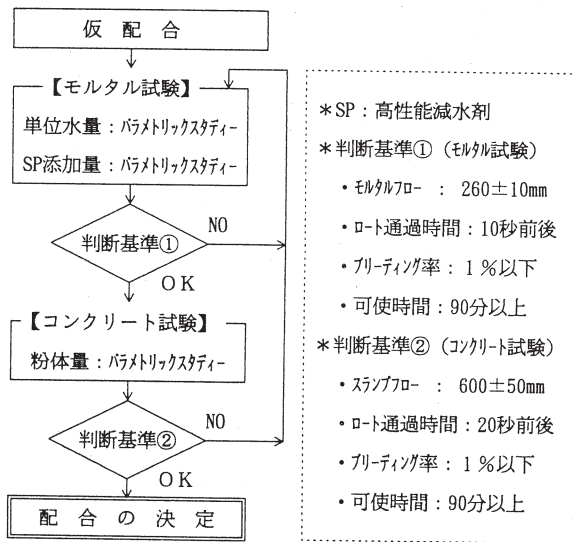


図7 F E C配合設計の手順

(1) 仮配合

任意のフライアッシュを用いたF E Cの配合を次のように仮定する。なお、粉体中のフライアッシュ混合率については、硬化後の強度、発熱特性等を考慮して別途定める。

- 粉体量 (P) : C + F = 500kg/m<sup>3</sup> (仮定)
- 粗骨材量 (G) : 実績率 (体積) の50%
- 単位水量 (W) : 水粉体比 (W/P) = 25~40%
- SP添加量 (SP) : 粉体量 × 1.0~3.0%
- AD添加量 (AD) : 単位水量 × 0.03% (仮定)
- 細骨材量 (S) : 1 - (P + G + W + SP + Air)

(2) モルタル試験

単位水量及び高性能減水剤添加量について、モルタル試験によるパラメトリックスタディを行い「判断基準①」に適合する配合を検討する。

(3) コンクリート試験

粉体量について、コンクリート試験によるパラメトリックスタディを行い「判断基準②」に適合する配合を検討する。

(4) 配合の決定

仮配合を上記のモルタル試験及びコンクリート試験から得られた最適値に置換し、最終的な配合を決定する。

4. F E Cのポンプ施工

4.1 F E Cの管内流動理論

フレッシュ時のF E Cは流動性に優れており「高粘性の液体のように挙動する」という性質から、レオロジー的に降伏値と塑性粘度を持つビンガム流体として取扱うことを仮定する。

ここでは、特に図8に示すようなF E Cの下方圧送時の流動理論を検討する。F E Cはビンガム流体であるとの仮定から、F E Cを流動させる駆動力は、ポンプ圧力とF E Cの自重である。このときの圧送管内を流動するF E Cの流速 (V) は次のとおり表せる。

$$V = \frac{gd^2}{32} \cdot \frac{i}{\eta} - \frac{gd}{3\gamma} \cdot \frac{\tau_y}{\eta}$$

$\tau_y$  : F E Cの見掛け降伏値 (t/m<sup>2</sup>)  
 $\eta$  : F E Cの見掛け塑性粘度 (m<sup>2</sup>/sec)  
 $\gamma$  : F E Cの単位体積重量 (t/m<sup>3</sup>)  
 $d$  : 圧送管の内径 (m)  
 $L$  : 圧送管の延長 (m)  
 $h$  : 圧送管の高低差 (m)  
 $P$  : ポンプ圧力 (t/m<sup>2</sup>)  
 $i$  : ポテンシャル勾配 = (h + P /  $\gamma$ ) / L

4.2 下方圧送試験

上記の流動方程式を用いて、F E Cの管内流速を計算する場合、粗骨材 (固体) の影響及び圧送管内面とのすべり抵抗の影響等を考慮した見掛け上のレオロジー定数 (降伏値  $\tau_y$ 、塑性粘度  $\eta$ ) を把握する必要がある。そこで、実規模の下方圧送試験によりポンプ圧力 (P) と管内流速 (V) との相関データを得て、この見掛け上のレオロジー定数の逆推定を試みた。

(1) 試験条件

下方圧送試験におけるF E Cの使用材料を表4、示方配合を表5に示す。圧送管は、図8に示すスキー場斜面に敷設し、ダイヤフラム式圧力計を8箇所取付けた。(圧送管敷設状況を写真4に示す。)

表4 下方圧送試験におけるF E Cの使用材料

材 料	種 類	備 考
セメント	普通ポルトランド	比重3.15、比表面積3340cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ	礫子火力 (国内炭)	比重2.17、比表面積3042cm <sup>2</sup> /g
細骨材	魚野川産	比重2.66、粗粒率2.73
粗骨材	魚野川産	比重2.72
混 和 剤	高性能減水剤 (SP)	アミノスルホン酸系 (遅延型)
	増粘剤 (AD)	アクリル系
水	トンネル湧水	—

表5 下方圧送試験におけるFECの示方配合

配合 No.	F/C+F (%)	W/P (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )							*重量表示	
				C	F	W	S	G	SP	AD		
FEC1	47	35	49	255	225	168	825	884	10.0	0.01		
FEC2	47	35	49	255	225	168	825	884	10.0	0.02		

配合 No.	F/C+F (%)	W/P (%)	s/a (%)	単 位 量 (ℓ/m <sup>3</sup> )							*容積表示	
				C	F	W	S	G	SP	AD		
FEC1	56	91	49	81	104	168	310	325	10.0	.003		
FEC2	56	91	49	81	104	168	310	325	10.0	.006		

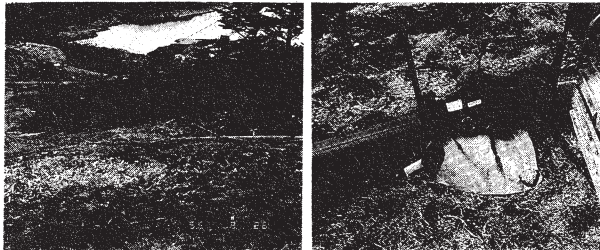


写真4 圧送管敷設状況

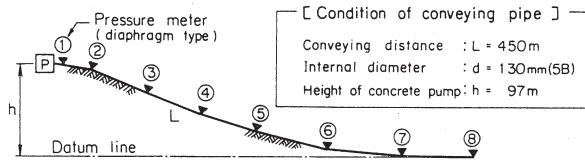


図8 圧送管敷設状況 (圧力計の取付け位置)

(2) 試験方法

圧送試験は、圧送管水押し→先送りモルタル→FEC 圧送の手順で行った。FEC 圧送は、ポンプ圧力を10 kgf/cm<sup>2</sup>~40kgf/cm<sup>2</sup>の範囲で変化させ、各圧力で定常流となった状態での圧送管内圧力と吐出量のデータを測定した。また、FEC のフレッシュ性状を確認するため、圧送前後のスランプフロー及びロート通過時間を測定した。

(3) 試験結果

延長約 460m、高低差約 100mの下方向き圧送管条件のもとで、FEC は途中で閉塞することなく順調に圧送された。そのときの圧送管内の流動状況を表6、図9に示す。

図9から、圧力計取付箇所の高さ (h) と管内圧力 (P/γ) を加算した点を結んだいわゆるポテンシャル線は、一定の勾配 (ポテンシャル勾配 i = (h + P/γ) / L) をもつ直線式で表される。つまり、

FEC を下方向きに圧送する場合には、その駆動力としてポンプ圧力の他にFECの自重も考慮できることを意味しており、一般に用いられる「圧力損失」を「ポテンシャル勾配」という概念に置き換えることが可能である。

表6のポテンシャル勾配 (i) と管内流速 (V) との関係を図10に示す。今回の下方圧送試験に用いた塑性粘度の異なる2種類のFECについて、それぞれの流動方程式 (V = A i - B、A = g d<sup>2</sup> / 32 η、B = g d τ<sub>y</sub> / 3 γ η) から、逆推定された見掛け上のレオロジー定数 (降伏値 τ<sub>y</sub>、塑性粘度 η) を表7に示す。

表6 FECの圧送管内の流動状況

種 類	圧送管内の流動状況		
	ポテンシャル勾配 i	管内流速 V (m/s)	吐出流量 Q (m <sup>3</sup> /h)
FEC-1 (粘性小)	1	0.29	9.6
	2	0.30	10.1
	3	0.33	10.4
	4	0.36	13.4
	5	0.39	14.2
	6	0.39	18.5
	7	0.41	18.0
	8	0.53	20.4
	9	0.54	23.9
	10	0.55	22.9
	11	0.62	29.7
FEC-2 (粘性大)	1	0.31	7.0
	2	0.39	8.9
	3	0.44	12.8
	4	0.49	13.1
	5	0.55	15.0
	6	0.61	14.3

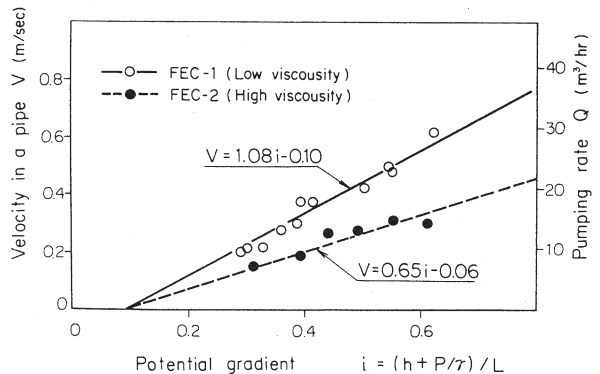


図10 ポテンシャル勾配と管内圧力との関係

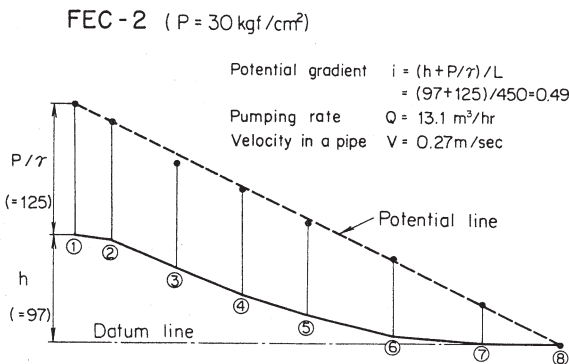
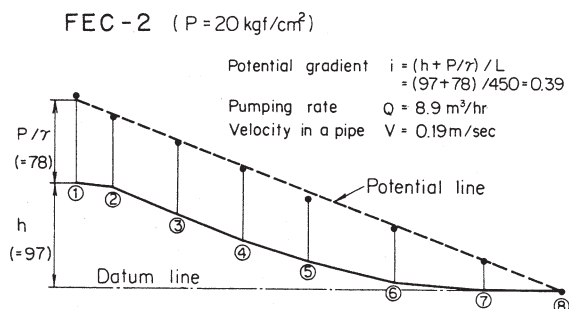
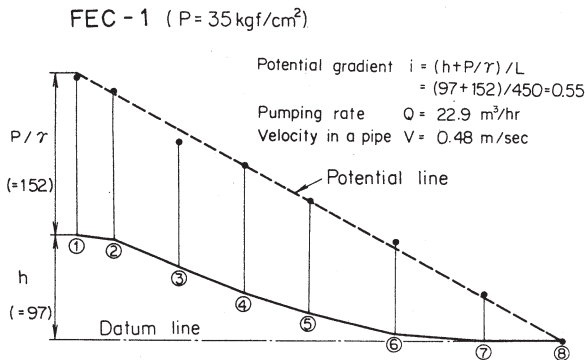
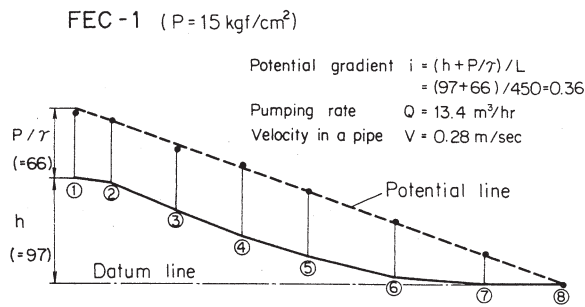


図9 圧送管内の流動状況

表7 FECの見掛け上のレオロジー定数

種類	$V = A i - B$		見掛け上のレオロジー定数	
	A	B	塑性粘度 $\eta$	降伏値 $\tau_y$
FEC-1(粘性小)	1.08	0.10	0.0048 m <sup>2</sup> /s	0.0027 t/m <sup>2</sup>
FEC-2(粘性大)	0.65	0.06	0.0080 m <sup>2</sup> /s	0.0027 t/m <sup>2</sup>

\* d = 0.13m,  $\gamma = 2.357 \text{ t/m}^3$

FECの性状に関して、圧送前と圧送後のスランプフロー、ロート通過時間を表8に示す。

表8 圧送前後におけるFECの性状

種類	試験	圧送前(平均)	圧送後(平均)
FEC-1 (粘性小)	スランプフロー	64cm	67cm
	ロート通過時間	23sec	5sec
FEC-2 (粘性大)	スランプフロー	60cm	56cm
	ロート通過時間	27sec	9sec

圧送後のFECの性状は、圧送前に比べてスランプフローは60±10cmの範囲でほぼ一定であるが、ロート通過時間は20~30秒から5~10秒程度へと急激に小さくなっている。ロート通過時間は粘性の概略的な指標となることから、圧送がFECの粘性低下に何らかの影響していると考えられるが、そのメカニズムについては圧送時のせん断外力によるものか、他の原因によるものか、現時点で明らかでない。ただし、この粘性低下が直ちに材料分離につながったという兆候はまったく認められなかった。

FECの性状と見掛け上のレオロジー定数との関係を整理し、表9に示す。FECのスランプフロー及びロート通過時間を簡便な試験によって求め、表9の関係から、見掛け上のレオロジー定数を把握できるならば、ポテンシャル勾配に基づく流動方程式を用いて、管内流速(吐出量)を計算により推定することが可能となる。

表9 FECの性状と見掛けレオロジー定数との関係

圧送前の性状		見掛け上のレオロジー定数	
スランプフロー	ロート通過時間	塑性粘度 $\eta$	降伏値 $\tau_y$
60±10cm	20sec前後	0.005 m <sup>2</sup> /s前後	0.003 t/m <sup>2</sup> 前後
	30sec前後	0.008 m <sup>2</sup> /s前後	0.003 t/m <sup>2</sup> 前後

### 4.3 FECのポンプ施工性の特徴

上記の圧送試験の結果から、FECのポンプ施工性に関する特徴は次のように整理できよう。

- ① FECは、高い粘性のため圧送負荷が大きく吐出流量は抑制され気味であるが、同時に粗骨材の凝集を防ぎ閉塞が少ないという利点がある。特に、下方圧送における閉塞の問題を解消したことは大きな技術的進歩と考えられる。
- ② FECは、可使時間(一定のワーカビリティを保持する時間)が90分以上と長い為、長距離圧送に適用可能である。
- ③ FECをビンガム流体と仮定し、見掛け上のレオロジー定数を用いた流動解析を行うことにより、合理的な施工計画策定を可能にする。

## 5. あとがき

以上、F E Cの配合設計およびポンプ施工に関する研究成果の一部を紹介した。F E Cなどのいわゆる高流動コンクリートは「締固め不要」による施工合理化が図れるものとして期待されているが、今後の課題として、①経済性、②製造管理の2点が挙げられよう。経済性については、フレッシュ時の施工性および硬化後の耐久性の観点からコストバランスを評価する必要がある。また、製造管理については、本論文で提案した配合設計法をベースに、現場で速やかに対応できるようなマニュアルを策定する必要があるだろう。

なお、本研究は資源エネルギー庁の石炭生産・利用技術振興費補助事業として実施しているものであり、関係各位の御尽力に深く謝意を表します。

### <参考文献>

- 1) 岡村 甫、前川 宏一、小澤 一雅：ハイパフォーマンスコンクリート
- 2) 谷川 恭雄、森 博嗣：フレッシュコンクリートのレオロジーと流動解析、コンクリート工学 Vol. 31 No. 10, 1993, 10

(1996年1月31日受付)