

# フライアッシュを多量に用いた硬化体の 配合設計および品質管理手法に関する研究

福留和人<sup>1</sup>・長瀧重義<sup>2</sup>・坂本守<sup>3</sup>・鈴木達雄<sup>4</sup>・喜多達夫<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 株式会社間組 技術研究所 (〒305-0822 茨城県つくば市荻間字西向515-1)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科 (〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐2の町8050番地)

<sup>3</sup>正会員 工修 株式会社間組 土木本部技術設計部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

<sup>4</sup>フェロー会員 工博 株式会社間組 技術・環境本部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

<sup>5</sup>フェロー会員 工修 株式会社間組 技術研究所 (〒305-0822 茨城県つくば市荻間字西向515-1)

セメントおよびフライアッシュを最適含水比に近い水分体比で練り混ぜると練り直後は、湿気のある粉の状態となるが、振動を与えると流体状に性状が変化し、密に締固めることが可能となる。この現象を利用してフライアッシュ硬化体を製造すれば、単位水量、セメント量および水分体比を大幅に低減できるため、経済的に品質の均一な硬化体を製造することが可能となる。

本研究では、フライアッシュ硬化体の配合設計および品質管理手法の検討を行った。検討の結果、フライアッシュの流動特性から配合を選定できること、流体化時間に基づく品質管理が可能であることを見出した。

**Key Words :** fly ash, high fly ash concrete, optimum moisture content, vibrating compaction, fluidization phenomenon, mixture design, quality control

## 1. はじめに

近年、石炭火力発電所の建設が推進されており、それに伴って石炭灰の発生量が大幅に増加することが予想されている。現在の石炭灰の発生量約600万トンに対し、2000年代には年間1,000万トンを超すものとも予想されている<sup>1)</sup>。

以上のような背景の中で、著者らは、フライアッシュの原粉を多量に用いた硬化体の製造技術を開発し<sup>2),3)</sup> (以下、フライアッシュ硬化体と呼ぶ。)、主として海洋構造物 (人工魚礁や漁場開発を目的とした人工海底山脈のブロックの製造等) への適用を検討してきた。この研究において、セメントおよびフライアッシュを最適含水比に近い低水分体比で練り混ぜた場合、練り直後は、湿気のある粉体の状態であるが、振動を与えると流体状に性状が変化し、締固めが可能となることを見出した<sup>4),5),6)</sup>。この現象を利用すれば、フライアッシュを多量に用いた硬化体の製造において、単位水量、セメント量および水分体比を大幅に低減でき、経済的に品質の高い硬化体の製造が可能となる。

一方、石炭火力発電所では、石炭の安定供給の観

点から、数十種類の産地の異なる石炭を使用している。また、石炭の品質に応じて産地の異なる石炭を混合して (混炭) 燃焼させる場合も多く、その組合せを考えれば、原炭の種類は、何十種類にもなる。さらに、フライアッシュの品質は、火力発電所のボイラーの規模、形式、燃焼条件等によっても異なるため、産出されるフライアッシュの品質は、大きな範囲でばらつく。フライアッシュ硬化体は、フライアッシュを多量に用いることから、最適な配合は、フライアッシュの品質に大きく影響を受ける<sup>4)</sup>。産業副産物の有効利用という観点に立てば、分級、ブレンド等を行うことなく、産出されるフライアッシュ原粉のまま利用することが望ましい。そのためには何らかの方法でフライアッシュの品質を把握し、それに応じて適切に配合を選定する手法を確立することが必要となる。

本研究では、フライアッシュの品質および振動締固め条件に応じた最適配合の選定手法および品質管理手法の開発を目的に検討を加えた。ここでは、各種特性の内、振動締固め特性および圧縮強度を取り上げ、これらを満足するための配合設計手法、品質管理手法を検討した。

表-1 フライアッシュの品質

フライアッシュ	発電所	密度 (g/m <sup>3</sup> )	ブレン比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	突固め試験*		化学成分(%)							
				最適含水比 (%)	最大乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	強熱減量	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
A	a	2.21	3,350	27.8	1.240	2.7	63.9	28.0	4.58	0.93	0.60	0.3	1.7
B		2.31	2,430	18.2	1.510	0.5	61.6	18.1	4.31	9.62	2.10	1.6	1.0
C		2.24	2,320	21.8	1.411	0.5	64.7	23.0	3.74	4.73	1.30	0.7	1.2
D		2.23	3,220	22.0	1.430	0.9	62.8	26.9	3.98	2.59	0.80	0.6	1.6
E		2.19	3,450	32.0	1.157	1.3	77.2	18.1	2.44	0.40	0.40	0.2	0.9
F		2.17	3,840	25.1	1.340	1.1	61.4	31.5	2.15	0.58	0.30	0.3	1.4
G	b	2.37	2,960	15.8	1.648	0.6	59.2	18.1	5.02	9.17	1.79	2.2	1.0
H	c	2.33	3,050	17.0	1.542	1.3	56.1	23.2	5.93	6.25	1.56	1.4	1.5
I	d	2.24	3,520	22.8	1.432	2.0	58.7	26.5	5.64	2.61	0.91	0.4	1.7
J	e	2.20	2,940	22.9	1.378	2.4	57.6	28.0	7.66	1.18	0.66	0.2	1.5
K	f	2.21	2,670	26.0	1.313	1.7	49.6	30.3	5.02	6.99	2.50	0.4	1.4
L	g	2.25	3,820	25.9	1.330	6.3	52.0	25.6	6.23	3.43	1.33	0.7	1.4
N	i	2.20	3,250	28.0	1.251	1.1	43.9	41.1	3.74	6.11	0.43	0.2	1.6
O	j	2.21	3,180	21.8	1.407	1.8	55.8	27.6	3.63	6.50	1.20	0.3	1.1
P	k	2.20	3,850	29.7	1.239	3.4	69.2	18.6	4.06	1.65	0.63	0.6	0.7

\* セメント添加率 (C/(C+F)) : 15%で混合したときの試験値。

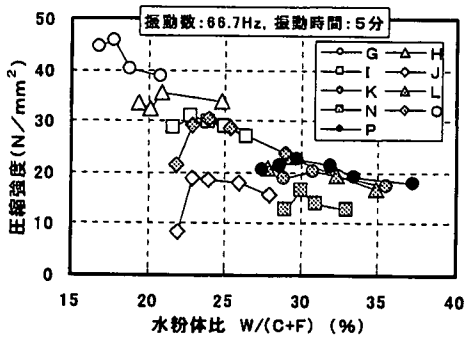


図-1 水粉体比と圧縮強度の関係

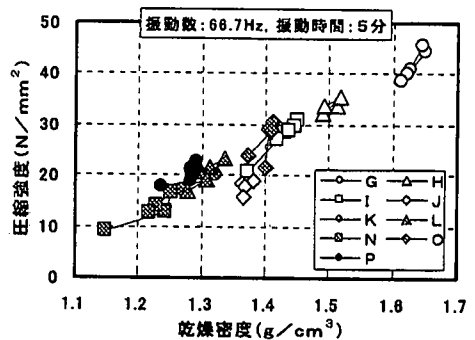


図-2 乾燥密度と圧縮強度の関係

## 2. 配合設計手法の検討

### (1) 水粉体比と圧縮強度の関係

表-1に示す15種類の内、10種類のフライアッシュ(G~P)を用いて水粉体比(W/(C+F))と圧縮強度の関係を調べた。セメントは、普通ポルトランドセメントを用い、セメント添加率(C/(C+F))は、15%とした。圧縮強度試験は、JIS A 1108に準じて行い、供試体寸法φ10×20cm、試験材齢28日とした。供試体は、大型V C試験器の振動台を用い、振動数66.7Hz、振幅1mm(両振幅)、振動時間5分の条件で締め固めた。また、締め固め直後の供試体の質量を測定し、型枠容積から乾燥密度を算定した。養生条件は、標準水中養生とした。

図-1に水粉体比と圧縮強度の関係を示す。図に示すように水粉体比が小さいほど高い強度が得られる

とはならず、圧縮強度が最も高くなる水粉体比が存在する。また、図-2に締め固め直後の乾燥密度と圧縮強度の関係を示すが、乾燥密度と圧縮強度の間には、高い相関があり、乾燥密度が高いほど圧縮強度が高くなっていることがわかる。一方、既報において、本研究で採用している振動締め固めの場合も、突固めによる締め固めと同様、乾燥密度が最大となる最適含水比が存在することを示した<sup>1)0</sup>。したがって、振動締め固めによる最適含水比と圧縮強度が最大となる水粉体比は、ほぼ一致すると考えても良い。ここで、最適含水比とは、乾燥密度が最大となる時の水と粉体(C+F)の質量比を示す。以下、突固めによる締め固め試験で得られる最適含水比と区別するために、振動締め固めによる最適含水比と呼ぶこととする。

フライアッシュ硬化体の配合設計においては、圧縮強度が最大となるように水粉体比を選定することが妥当と考えられる。すなわち、配合設計では、振

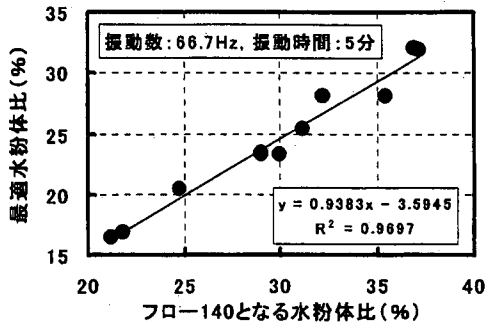


図-3 フロー値140となる水粉体比と最適水粉体の関係

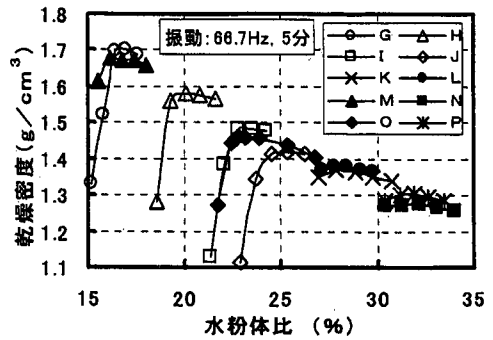


図-5 水粉体比と乾燥密度の関係

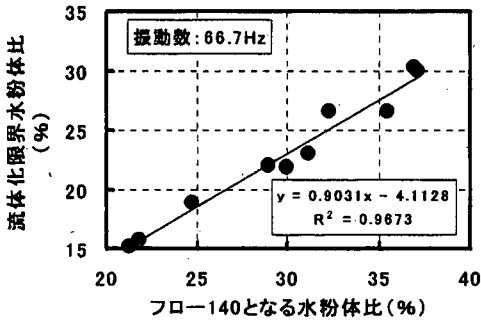


図-4 フロー値140となる水粉体比と流体化限界最適水粉体の関係

動締固めによる最適含水比を如何に精度良く推定するかがポイントとなる。なお、最適含水比という表現は、自然に存在する土を対象とした用語であり、セメントコンクリートの配合を表現する用語として不適と言える。したがって、ここでは振動締固めによる最適含水比、すなわち、圧縮強度が最大となる水粉体比を最適水粉体比と呼ぶこととする。

## (2) 水粉体比を表す係数の導入

既報において、フロー値140となる水粉体比と最適水粉体比(振動数66.7Hz, 振動時間5分)は相関が高く、最適水粉体比を推定する上で有用な指標になりうることを明らかにした<sup>9), 10)</sup>。図-3にフロー値140となる水粉体比と最適水粉体比の関係を示す。この図から、上記振動条件による場合、最適水粉体比を精度良く予測することはできる。しかしながら、最適水粉体比は、与える振動条件によって異なることから<sup>9)</sup>、振動条件に応じた最適水粉体比の選定手法の確立が必要となる。また、製造時においては、後述するように、振動締固め特性に応じて微調整が必要となる。

以上のことから、最適水粉体比の大小によらない

水粉体比を表す無次元化された係数の導入が必要と考えた。前述のように、最適水粉体比と高い相関があることから、フロー値140となる水粉体比を基準の水粉体比とすることとした。一方、既報において流体化が生じる限界の水粉体比(以下、流体化限界水粉体比)を流体化時間が5分となる水粉体比と定義すると、この値と最適水粉体比は、高い相関があることを示した<sup>9)</sup>。ここで、流体化時間とは、湿気のある粉体から流体状に性状変化するまでの振動時間であり、振動締固め試験時に目視による観察によって測定した<sup>9)</sup>。

また、図-4に示すように、フロー値140となる水粉体比と流体化限界水粉体比の間にも高い相関が見られる。これらのことから、流体化限界水粉体比も最適水粉体比を選定する上で基準となるものと考えられる。なお、フライアッシュ毎に一定の値であること、および、現存する振動台で与えられる振動条件であることを考慮して、振動数66.7Hzにおける流体化限界水粉体比を用いることとした。

以上のことから、フロー値140となる水粉体比および流体化限界水粉体比を基準とした以下のような係数 $\alpha$ を提案する。

$$\alpha = \{(W/(C+F) - W_{lim}) / (W_{f140} - W_{lim})\} \quad (1)$$

ここに、 $W/(C+F)$ : 水粉体比、 $W_{lim}$ : 振動数66.7Hzにおける流体化限界水粉体比、 $W_{f140}$ : フロー値140となる水粉体比である。

ここで、水粉体比は、式(1)で $\alpha=0$ とおけば、流体化限界水粉体比に、 $\alpha=1$ とおけば、フロー値140となる水粉体比となる。したがって、本研究で対象としている振動条件の範囲では、最適水粉体比を与える $\alpha$ は、0から1の間に存在することにある。

次に、係数 $\alpha$ が、最適水粉体比選定の上で妥当な係数となり得るかどうかを検証した。

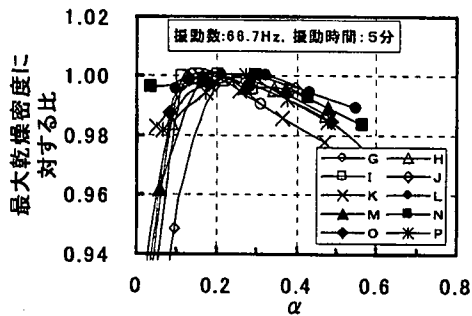


図-6  $\alpha$ と最大乾燥密度に対する比の関係

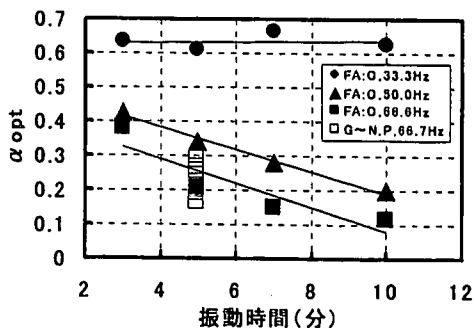


図-8 振動時間と  $\alpha_{opt}$  の関係

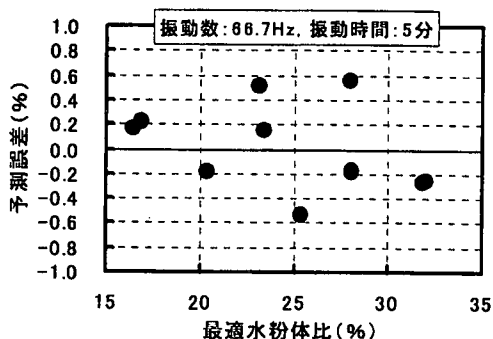


図-7 最適水分体比と予測誤差の関係

水分体比と乾燥密度の関係<sup>7,8)</sup>(図-5参照)において、乾燥密度を最大乾燥密度で除して無次元化し、また、水分体比を係数 $\alpha$ に換算して、それらの関係を求めた。図-6に係数 $\alpha$ と乾燥密度の最大乾燥密度に対する比の関係を示す。図に示すように、フライアッシュの種類によって若干バラツキが見られるが、最適水分体比における係数 $\alpha$ (以下、 $\alpha_{opt}$ )は、0.16~0.27の範囲にある。したがって、振動数66.7Hz、振動時間5分の振動条件では、最適水分体比を与える係数 $\alpha$ は、0.23程度(平均値)ということになる。図-7に $\alpha_{opt}$ を0.23としたときの最適水分体比と予測誤差の関係を示す。最適水分体比の予測誤差は、 $\pm 0.5\%$ 程度となるが、最適水分体比の大小とは無関係である。また、図-1および図-5においてこの程度の水分体比の予測誤差が生じたとしても乾燥密度、圧縮強度への影響は、実用上ほとんど問題にならないと考えられる。したがって、フライアッシュの種類に拘わらず、ほぼ同様の $\alpha$ 値において最適水分体比を与えると考えても差し支えないと考えられる。 $\alpha_{opt}$ が与えられれば、下式により最適水分体比( $W_{opt}$ )を算定できる。

$$W_{opt} = W_{lim} + \alpha_{opt} \cdot (W_{f140} - W_{lim}) \quad (2)$$

### (3) 振動条件に応じた最適水分体比の選定方法

(2)で示した $\alpha_{opt} = 0.23$ は、振動数66.7Hz、振幅1mm(両振幅)、振動時間5分の振動条件において、最適水分体比を与える係数である。つまり、 $\alpha_{opt}$ は、振動条件によって適切に選定することが必要となる。そこで、振動条件に応じた $\alpha_{opt}$ の選定手法を検討した。

振動数および振動時間と最適水分体比の関係<sup>9)</sup>から、各条件における最適水分体比を与える $\alpha_{opt}$ の値を求めた。図-8に各振動数毎の振動時間と $\alpha_{opt}$ の関係を示す。

振動数33.3Hzでは、振動時間に拘わらずほぼ一定の値となっているが、振動数50.0および66.7Hzでは、振動時間を長くするほど $\alpha_{opt}$ の値は小さくなっている。

振動数の増大、振動時間の延長に伴って最適水分体比あるいは $\alpha_{opt}$ が低減するのは、与える振動エネルギーの増大に伴って、より低水分体比で締固めが可能となることによるものと考えられる。そこで、それぞれの振動条件における振動エネルギーを算定し、 $\alpha_{opt}$ との関係を求めた。

単位容積の試料に与える振動エネルギーは、下式で与えられる<sup>9)</sup>。

$$E = m \cdot \alpha_{max}^2 \cdot t / ((2\pi)^2 \cdot f) \quad (3)$$

ここに、E: 振動エネルギー (J/l)、f: 振動数 (1/s)、t: 振動時間 (s)、 $\alpha_{max}$ : 最大加速度 ( $m/s^2$ )、m: 試料の密度 (kg/l)

図-9に振動エネルギーと $\alpha_{opt}$ の関係を示す。振動数によって若干異なる関係が見られるようである。

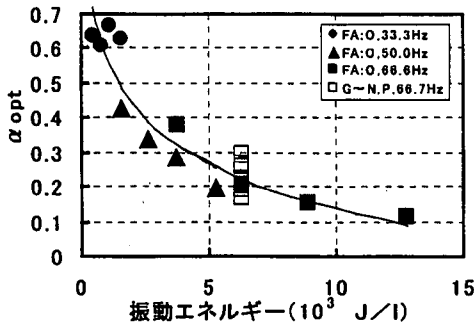


図-9 振動エネルギーと  $\alpha_{opt}$  の関係

最適水粉体比の測定誤差の影響、振動数が高いほどエネルギーの損失が大きくなること、等がその理由として挙げられるが、実用上は、振動エネルギーから最適水粉体比を与える  $\alpha_{opt}$  を予測可能と考えられる。

図-8および図-9に示すように、最適水粉体比を与える  $\alpha_{opt}$  は、フライアッシュの種類によって0.05程度の予測誤差が生じる。湿気のある粉体の状態から振動の作用で流体化する現象を有効に利用するとすれば、フライアッシュ硬化体の製造時の振動数は、50Hz程度以上とするのが望ましいが<sup>9)</sup>、その振動条件では、 $\alpha_{opt}$  の範囲は、0.1~0.4程度である。

$\alpha_{opt}$  の範囲に対して予測誤差が大きいと言えるが、フライアッシュの種類による最適水粉体比の変動範囲(15~30%程度)に対する誤差は、十分小さいものと考えられる。今回、フライアッシュO以外は、各種振動条件における締固め試験は実施していない。今後、図-9に示す関係が各種のフライアッシュに適用可能であるかどうかを検証していくことが必要である。

#### (4) セメント添加率の選定方法の検討

(1) に示したようにフライアッシュの種類によって最適水粉体比は大幅に異なるため、要求される性能の硬化体を経済的に製造するためには、最適水粉体比に応じてセメント添加率を選定することが必要となる。硬化体に要求される性能は、その用途によって種々考えられるが、ここでは、最も代表的な性能である圧縮強度を取り上げ、要求される圧縮強度に応じたセメント添加率の選定方法を検討した。

表-1に示す15種類のフライアッシュを用いて、セメント添加率一定 ( $C/(C+F):15\%$ ) のもて、水粉体比を変化させて圧縮強度を測定した。ここで、最適水粉体比より低水粉体比側では、圧縮強度が低下するため、最適水粉体比およびフロー値140 となる

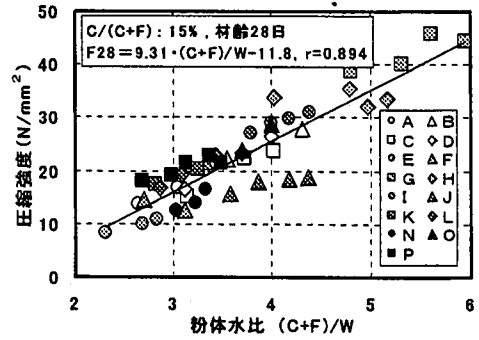


図-10 水粉体比と圧縮強度の関係

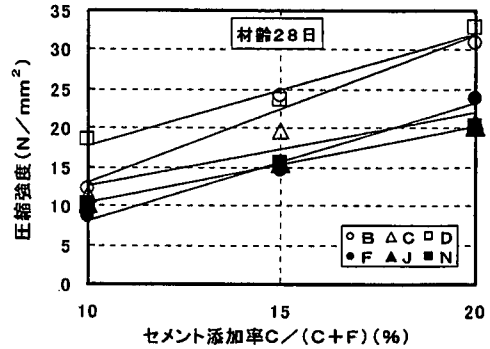


図-11 セメント添加率と圧縮強度の関係

水粉体比の間で水粉体比を変化させた。また、6種類のフライアッシュ (B, C, D, F, およびN) を用いて、セメント添加率を10および20%に変化させて圧縮強度を測定した。セメントは、普通ポルトランドセメントとした。圧縮強度試験は、JIS A 1108に準じて行い、供試体寸法  $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 、試験材齢28日とした。供試体は、大型V C試験器の振動台を用い、振動数66.7Hz、振幅1mm (両振幅)、振動時間5分の条件で締め固めた。

図-10にセメント添加率 ( $C/(C+F):15\%$ ) を一定としたときの粉体水比と圧縮強度の関係を示す。フライアッシュの種類によって若干ばらつきは見られるが、粉体水比と圧縮強度の関係はほぼ直線関係にあり、実用上は、粉体水比によって圧縮強度の予測が可能であると考えられる<sup>9)</sup>。

図-11にセメント添加率と圧縮強度の関係を示す。図に示すように、セメント添加率と圧縮強度は、ほぼ直線関係にある<sup>9)</sup>。そこで、それぞれのフライアッシュで基準の圧縮強度 (ここでは、 $20 \text{ N/mm}^2$ とした。) となるセメント添加率を算定し、その値とセメント添加率の偏差と圧縮強度の関係を求めた。

図-12にセメント添加率の偏差と圧縮強度の関係

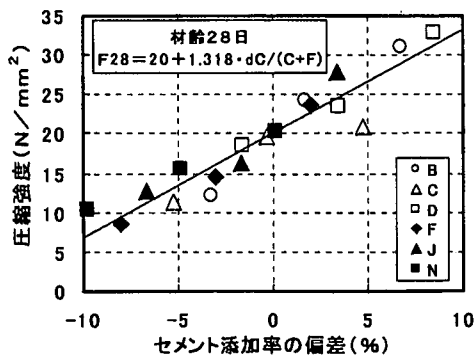


図-12 セメント添加率の偏差と圧縮強度の関係

を示す。図に示すように、基準の圧縮強度となるセメント添加率との偏差と圧縮強度の関係は、フライアッシュの種類によらずほぼ一つの直線で表すことが可能である。

以上のことから、各フライアッシュで、図-10 および最適水粉体比からセメント添加率15%における圧縮強度を推定し、推定した圧縮強度と目標強度の差に応じてセメント添加率を補正すれば、フライアッシュの品質に応じた配合の選定が可能となる。

#### (5) 配合設計手法の提案

(1) ~ (4) から以下に示す手順で配合を選定することが可能である。図-13に配合設計フローを示す。

##### a) 振動条件の設定

製造設備、製造効率等を考慮して、締固めの振動条件を選定する。

##### b) $\alpha_{opt}$ の設定

振動条件から与えられる振動エネルギーを算定し、係数 $\alpha$ の最適値( $\alpha_{opt}$ )を選定する。(図-9参照)

##### c) フライアッシュの品質試験

入荷したフライアッシュを用いて、水粉体比とフロー値の関係の求め、フロー値140となる水粉体比を測定する。また、JIS R 5201に準じて、フライアッシュの密度を測定する。

##### d) 流体化限界水粉体比の推定

フロー値140となる水粉体比(Wf140)から、流体化限界水粉体比(Wlim)を推定する。(図-4参照)

$$Wlim = 0.903 \cdot Wf140 - 4.11 \quad (4)$$

##### e) 水粉体比の選定

フロー値140となる水粉体比(Wf140)、流体化限界水粉体比(Wlim)および $\alpha_{opt}$ から、最適水粉

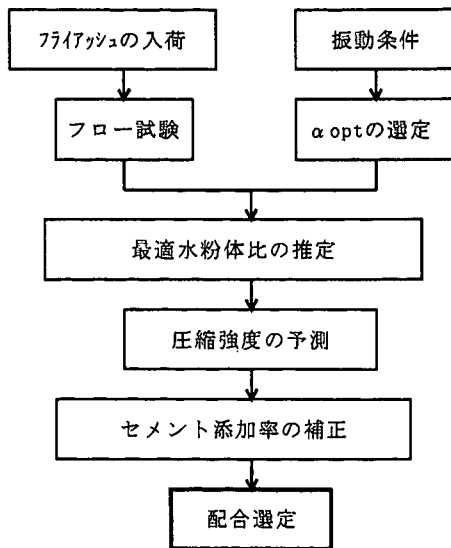


図-13 配合設計フロー

体比( $W_{opt}$ )を算定する。

$$W_{opt} = Wlim + \alpha_{opt} \cdot (Wf140 - Wlim) \quad (5)$$

##### f) セメント添加率の選定

水粉体比から、セメント添加率15%における圧縮強度(材齢28日の圧縮強度:  $F_{28c:15}$ )を予測する。予測した圧縮強度から目標圧縮強度( $F_{28}$ )が得られるようにセメント添加率( $C/(C+F)$ )を補正する。

$$F_{28c:15} = 9.31 \cdot (C+F) / W - 11.8 \quad (6)$$

$$C/(C+F) = 15 - (F_{28} - F_{28c:15}) / 1.318 \quad (7)$$

##### g) 配合算定

水粉体比、セメント添加率およびセメント、フライアッシュの密度から、示方配合を算定する。

以上のように、フロー試験と密度測定を行えば、短時間にフライアッシュの品質に応じて適切に配合を選定することが可能となる。ただし、各種振動条件における各種フライアッシュの振動締固めデータの不足、フライアッシュの品質による強度発現特性の差異等から、推定値がばらつくことが予想される。実用上は、適度の安全率を見込むことで対応可能と考えられるが、今後、さらにデータを蓄積し、予測式の精度向上を図ることが必要と言える。また、上記は、普通ポルトランドセメントを用いた場合の推定式である。今後、他の種類のセメントを用いたデータの収集が望まれる。

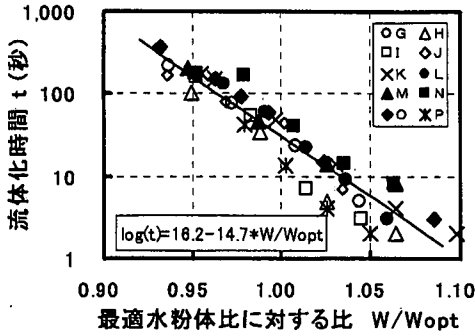


図-14 最適水粉体比に対する比と流体化時間の関係

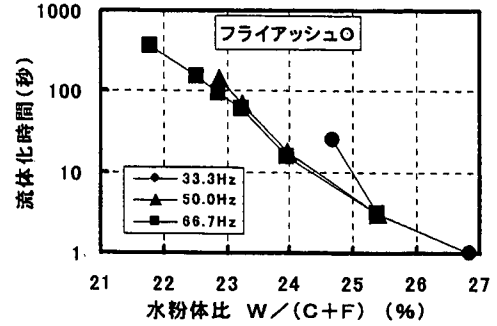


図-15 水粉体比と流体化時間の関係 (振動数の影響)

### 3. 流体化時間に基づく品質管理手法

2. に示した手順に従えば、所要の振動締め特性および圧縮強度が得られるように、配合を選定することが可能となる。しかしながら、フライアッシュの品質のばらつき、予測誤差等から、振動締め特性は変動することが予想される。

一方、振動締め特性に関する研究において、水粉体比を最適水粉体比で除して無次元化した値と流体化時間は、フライアッシュの種類に拘わらず一定の関係にあり (図-14 参照)、振動締め特性を評価する上で流体化時間は、有用な特性値となる可能性があることを示した<sup>9)</sup>。この図から、フライアッシュの種類が変わっても同一の振動条件 (振動数、振動時間) で締固める場合、同一の流体化時間となるように水粉体比を選定すればよいと言える。

以上の観点から、流体化時間に基づく品質管理手法の検討を行った。ここで、振動締め試験は、水粉体混合物の締め特性を評価する試験であり、流体化時間は、水粉体混合物のコンシステンシーを評価する試験値とすることができる。モルタルの浮上がりが見られるまでの振動時間を示すRCD用コンクリートのVC値と類似した試験値と言える。

#### (1) 最適流体化時間の選定方法

図-15 に各振動数毎の水粉体比と流体化時間の関係を示す。この関係から、水粉体比を最適水粉体比で除して流体化時間との関係を求めた。図-16 に振動数一定 (66.7Hz) のもとで振動時間を変化させた時の水粉体比の最適水粉体比に対する比と流体化時間の関係を示す。同様に、振動時間を一定として

(5分)、振動数を変化させた時の水粉体比の最適水粉体比に対する比と流体化時間の関係を求めると図-17 ようになる。これらから、各振動条件にお

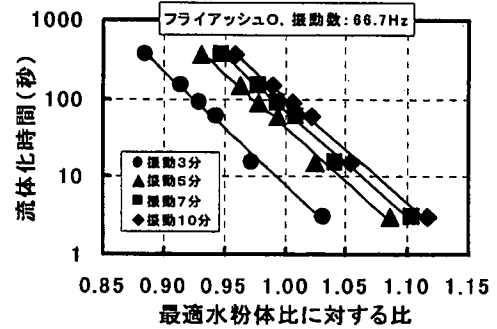


図-16 最適水粉体比に対する比と流体化時間の関係 (振動時間の影響)

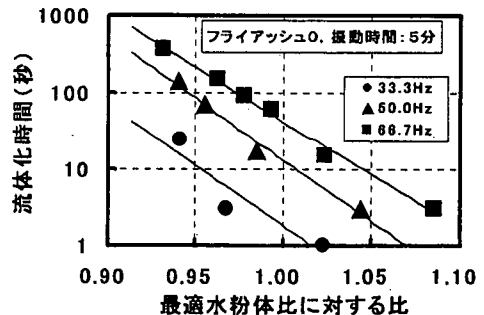


図-17 最適水粉体比に対する比と流体化時間の関係 (振動数の影響)

いて最適水粉体比となる流体化時間、すなわち、図-16および図-17において水粉体比の最適水粉体比に対する比が1となるときの流体化時間 (以下、最適流体化時間と呼ぶ。) を算定し、各振動条件における振動エネルギーとの関係を求めた。

図-18 に振動エネルギーと最適流体化時間の関係を示す。振動数毎に若干異なる関係が見られるが、

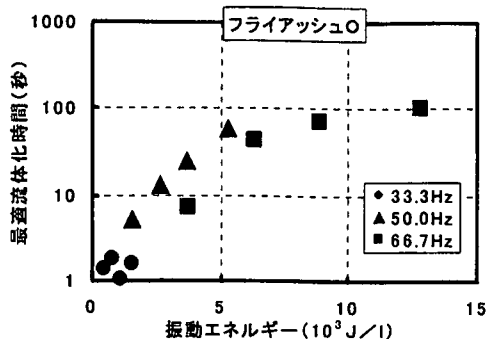


図-18 振動エネルギーと最適流体化時間の関係

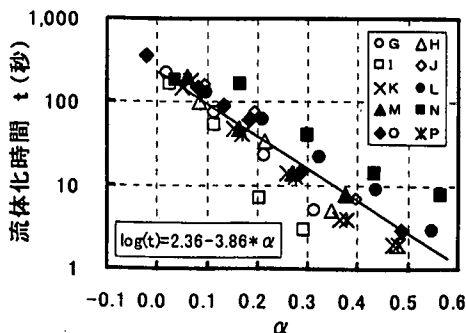


図-19  $\alpha$ と流体化時間の関係

振動エネルギーによって最適流体化時間をおおよそ算定することができる。すなわち、振動条件に応じて、適切に最適流体化時間を選定することが可能である。このことは、たとえば振動時間を長く確保できる場合には、水粉体比が小さく流体化時間の長い配合とすることが望ましく、また、振動時間を短くする場合には、水粉体比が大きく短時間で流体化する配合とするのが望ましいということの意味している。

また、製造時には、最適流体化時間を目標値として品質管理を行えばよいと言える。RCD用コンクリートで、目標VC値を設定して品質管理を行うことと同様である。

## (2) 製造開始時の配合調整方法

最適水粉体比の予測誤差、試験誤差等から、選定した配合では、所要の振動締固め性状（最適流体化時間）が得られないことが予測される。これは、主として流体化限界水粉体比と最適水粉体比の予測誤差によると考えられる。

図-14 に示すように水粉体比の最適水粉体比に対する比と流体化時間の関係は、フライアッシュの種類に拘わらず一定であることから、製造開始時の流体化時間の測定値から実際の流体化限界水粉体比と最適水粉体比を推定することができる。以下、振動数66.7Hzの場合について予測方法を示す。

目標流体化時間を $T_0$ 、示方配合における水粉体比を $(W/(C+F))_0$ とし、製造開始時の流体化時間が $T$ である場合を想定する。

水粉体比の最適水粉体比に対する比と流体化時間は、線形関係にあることから、以下の式が成り立つ（図-14 参照）。

$$\log(T) = 16.2 - 14.7 \cdot (W/(C+F))_0 / W_{opt} \quad (8)$$

$$\log(T_{lim}) = 16.2 - 14.7 \cdot W_{lim} / W_{opt} \quad (9)$$

ここに、 $T_{lim}$ ：流体化限界水粉体比における流体化時間（300 秒）である。

式(8)および(9)から、最適水粉体比 ( $W_{opt}$ ) および流体化限界水粉体比 ( $W_{lim}$ ) を算定すると以下のようになる。

$$W_{opt} = 14.7 \cdot (W/(C+F))_0 / (16.2 - \log(T)) \quad (10)$$

$$W_{lim} = \frac{(16.2 - \log(T_{lim}))}{(16.2 - \log(T))} \cdot (W/(C+F))_0 \quad (11)$$

以上のように、流体化時間を測定することによって、最適水粉体比および流体化限界水粉体比の予測誤差を補正することが可能である。

## (3) 製造中の配合の微調整方法

フライアッシュ硬化体の製造においては、入荷したフライアッシュのロット毎に配合を選定することになるが、同一ロット内においてもフライアッシュの品質が変動することが予想される。また、気温その他の条件の変動によるばらつきも予想される。以下、製造中の流体化時間の変動に対する配合の微調整方法を示す。

各種フライアッシュを用いたときの $\alpha$ と流体化時間の関係を求めると図-19 のようになる。ここで、振動数は、66.7Hzである。フライアッシュの種類によってばらつきは見られるが、直線の勾配は、ほぼ一定と見なすことができる。すなわち、製造時の流体化時間の変動に対する水粉体比の微調整においては、直線の勾配が、フライアッシュの種類に拘わらず一定と見なすことによる誤差はさほど大きくないものと考えられ、最適流体化時間となるように $\alpha_{opt}$ の値を調整することが可能となる。以下、振



動数66.7Hzの場合の $\alpha$ の調整方法について示す。

示方配合で係数 $\alpha_{opt}$ を選定し、最適流体化時間は、 $T_0$ であるが、流体化時間が $T$ に変動した場合を想定する。最適流体化時間 $T_0$ とするための係数 $\alpha$ の補正値を $d\alpha$ とおくと、 $\alpha$ と流体化時間の $\alpha$ 数が線形関係にあることから以下の式が成り立つ。

(図-19参照)。

$$\log(T) = 2.36 - 3.86 \cdot \alpha_{opt} \quad (12)$$

$$\log(T_0) = 2.36 - 3.86 \cdot (\alpha_{opt} + d\alpha) \quad (13)$$

式(12)および(13)から、 $d\alpha$ を求めると以下のようになる。

$$d\alpha = (\log(T_0) - \log(T)) / 3.86 \quad (14)$$

以上のように、品質管理試験として流体化時間を測定することによって、所要の振動締固め特性が得られるように配合の微調整を行うことが可能である。

#### 4. まとめ

最適含水比付近で練り混ぜたフライアッシュ・セメント混合物の振動による流体化現象を利用したフライアッシュ硬化体の配合設計手法および品質管理手法を検討した。本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

(1) 水粉体比を表す係数として、フロー値140となる水粉体比および流体化限界水粉体比を基準とした係数 $\alpha$ を提案した。最適水粉体比を与える $\alpha$ の値( $\alpha_{opt}$ )は、フライアッシュの種類に拘わらずほぼ同様の値となる。

(2) 振動エネルギーと最適水粉体比を与える $\alpha_{opt}$ の値の関係は、振動数によらず一つの曲線で表され、振動エネルギーから最適な $\alpha_{opt}$ を選定することが可能である。

(3) 湿った粉体から流体状に性状変化するまでの流体化時間は、振動締固め特性を評価する上で有用な指標となる。すなわち、最適水粉体比における最適流体化時間は、振動エネルギーから選定することができる。

(4) 水粉体比の最適水粉体比に対する比と流体化時間の対数の関係が線形関係にあることを利用すれば、最適流体化時間となるように配合の調整が可能である。

謝辞：本研究では、水産庁の補助金により福井県立大学中村充座長のもと社団法人マリノフォーラム21が実施している「マウンド漁場造成システムの開発」における石炭灰硬化体製造実験の結果を一部利用させて頂いた。ここに記して、感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 環境技術協会・日本フライアッシュ協会：石炭灰ハンドブック(第2版)、II. 応用編、pp. II1-21, 1995.
- 2) 鈴木達雄, 門馬尚義, 谷口公一：石炭灰混合体の人工魚礁としての適用性, 間組研究年報, pp. 333-344, 1987.
- 3) 長瀧重義, 大賀宏行, 谷口公一, 染谷健司：フライアッシュを用いた新硬化体の海洋構造物への適用性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, No. 1, pp. 211-216, 1987.
- 4) 福留和人, 坂本守, 鈴木達雄, 長瀧重義：石炭灰を多量に用いた新しい硬化体製造方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 223-228, 1997. 6.
- 5) 福留和人, 坂本守, 鈴木達雄, 喜多達夫, 長瀧重義：フライアッシュを多量に用いた硬化体の配合設計手法の検討, 土木学会フライアッシュコンクリートシンポジウム論文報告集, pp. 37-44, 1997. 12.
- 6) 福留和人, 坂本守, 鈴木達雄, 長瀧重義：フライアッシュを多量に用いた硬化体の基本特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 91-96, 1998. 7.
- 7) 福留和人, 坂本守, 鈴木達雄, 喜多達夫, 長瀧重義：最適含水比付近で練り混ぜたフライアッシュ・セメント混合物の振動締固め特性, 日本コンクリート工学協会超硬練りコンクリート技術に関するシンポジウム論文集, pp. 43-50, 1998. 6.
- 8) 福留和人, 長瀧重義, 坂本守, 鈴木達雄, 喜多達夫：最適含水比近傍で練り混ぜたフライアッシュ・セメント混合物の振動締固め特性に関する研究, 土木学会論文集, No. 627/V-44, pp. 43-50, 1999. 8.
- 9) 国府勝郎, 近藤拓也, 上野教：RCCP用コンクリートの締固め性試験方法に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 46, pp. 964-969, 1992.

(2000. 1. 5受付)

# A STUDY ON MIXTURE DESIGN AND QUALITY CONTROL METHOD OF HIGH FLY ASH CONCRETE

Kazuto FUKUDOME, Shigeyoshi NAGATAKI, Mamoru SAKAMOTO,  
Tatsuo SUZUKI and Tatsuo KITA

Fly ash-Cement mixture mixed at low water content close to optimum moisture content is only wet powder immediately after mixing. After going through vibration compaction for a few minutes the wet powder becomes fluidized and can be sufficiently compacted. By applying this fluidized phenomenon for manufacturing, water to powder ratio and cement content can be reduced. So quality and cost efficiency of high fly ash concrete can be improved.

In this study the authors investigated the method of mixture design and quality control of high fly ash concrete. From the investigation, it was found that the optimum mixture can be determined by the flow tests of fly ash and quality of high fly ash concrete can be controlled by the fluidization time.