

論文 フライアッシュを多量に用いた硬化体の基本特性

福留和人*¹・坂本守*²・鈴木達雄*³・長瀧重義*⁴

要旨：セメントおよびフライアッシュを最適含水比に近い水粉体比で練混ぜると練上り時は湿気のある粉体の状態であるが、振動を与えると流体に性状が変化し、締固めが可能となることを利用して製造した硬化体の硬化過程および硬化後の基本特性を調査した。フライアッシュの多量使用にもかかわらず、ブリーディングはほとんど発生せず、また、実用上問題のない凝結特性、強度発現性を有していることが明らかとなった。なお、骨材を使用していないこと、低水粉体比であることから、断熱温度上昇特性および圧縮強度と他の物理的特性の関係は、一般的なコンクリートと異なることが明らかとなった。

キーワード：フライアッシュ、硬化体、ブリーディング、断熱温度上昇特性、強度特性

1. はじめに

著者らは、フライアッシュの有効利用の一方法として、フライアッシュを多量に用いた硬化体の製造方法を提案した¹⁾。本製造方法は、セメントおよびフライアッシュを最適含水比に近い極めて低い水粉体比で練混ぜると練上がり時は、湿気のある粉体であるが、振動を与えると性状が流体状に変化し、締固めが可能になること利用していることが特徴である。本製造方法によれば、単位セメント量および単位水量が低減できるため経済性および品質の向上が可能となる。これまで、主として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の海洋構造物への適用を進めてきたが^{2), 3), 4)}、今後フライアッシュの発生量が大幅に増加することが予想されることから、さらに用途開発を進めることが重要となる。

以上のような背景から、本研究では、上記方法で製造した硬化体の各種特性について調査を行った。本論文では、得られた結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) セメント

普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³、比表面積 3,280cm²/g）を用いた。

(2) フライアッシュ

10カ所の発電所から産出された15種類のフライアッシュを用いた。使用したフライアッシュの品質を表-1に示す。ここで、使用したフライアッシュは、原粉であるため、一部のフライアッシュはJIS規格を満足していない。

(3) 硬化促進剤

フライアッシュの硬化促進剤には食塩（NaCl、並塩）を用いた。

2.2 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜには、容量50リットルのパン型強制練りミキサを用い、セメントおよびフライアッシュを投入し、30秒間空練りを行なった後、水および硬化促進剤を投入し、180秒間練混ぜた。硬化促進剤は、あらかじめ水に溶解した。練混ぜは、温度20±3℃の恒温室内で行な

* 1 (株) 間組技術研究所技術研究部第2研究室 (正会員)

* 2 (株) 間組土木本部技術設計部, 工修 (正会員)

* 3 (株) 間組土木本部港湾・海洋統括部課長, 工博 (正会員)

* 4 新潟大学教授 工学部建設学科, 工博 (正会員)

った。

2.3 供試体作製方法

硬化体の締固めには、大型VC試験に用いられる振動テーブルを用いた。振動条件は、振動数：4,000rpm、振幅：1.0mmであり、振動時間は、5分間とした。

2.4 配合条件

水粉体比(W/(C+F))は、上記の振動条件で圧縮強度が最大となる水粉体比(以下最適水粉体比と呼ぶ)を基本とした¹⁾。また、セメント添加率(C/(C+F))は、15%、硬化促進剤は、単位水量に対して3.3%と一定と

した。表-2に基本となる配合を示す。最適水粉体比は、フライアッシュの品質によって大きく異なる¹⁾ため、表-2に示すように配合は、フライアッシュによって大幅に異なっている。

2.5 試験項目および試験方法

(1) 硬化過程における特性

ブリーディング試験(JIS A 1123に準拠)、凝結試験(JIS A 6204附属書1に準拠)および断熱温度上昇試験(空気循環式、容量50リットル)を実施した。ブリーディングおよび凝結試験の試験時の環境温度および断熱温度上昇試験の試験開始時の温度は、20±3℃とした。

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 ³)	プレーン比表面積 (cm ² /g)	突き固め試験 ¹⁾		化学成分(%)							
				最適含水比 (%)	最大乾燥密度 (kg/m ³)	強熱減量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	TiO ₂
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

*) C/(C+F) : 15%で混合したときの試験値。

表-2 フライアッシュ硬化体の配合

フライアッシュ	発電所	水粉体比 W/(C+F) (%)	セメント 添加率 C/(C+F) (%)	単位量(kg/m ³)			
				水 W	セメント C	フライアッシュ F	硬化促進剤 ad.
A	a	30.8	15.0	416	203	1,149	13.7
B		23.2		359	232	1,315	11.8
C		26.8		386	216	1,223	12.7
D		27.0		386	215	1,217	12.7
E		37.3		461	186	1,051	15.2
F		30.1		407	203	1,150	13.4
G	b	17.0		295	260	1,475	9.7
H	c	20.9		336	241	1,367	11.1
I	d	22.8		348	229	1,297	11.5
J	e	26.2		377	216	1,222	12.4
K	f	27.9		392	211	1,194	12.9
L	g	27.8		395	213	1,207	13.0
N	i	31.6		421	200	1,134	13.9
O	j	22.5		343	228	1,295	11.3
P	k	29.7		406	205	1,162	13.4

(2) 硬化後の特性

圧縮強度 (JIS A 1108に準拠), 引張強度および静ヤング係数 (コンプレッソメータによる) の測定を行った。供試体寸法は, $\phi 10 \times 20$ cmとし, 圧縮強度は, 試験材齢3, 7, 28, 91, 182および365日に, 引張強度および静ヤング係数は, 試験材齢7, 28および91日に試験を行った。供試体の養生は, $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の水中養生とした。

3. 試験結果および考察

3.1 硬化過程における特性

(1) プリーディング特性

最適水粉体比の異なる4種類 (30%以上1種類, 20~30%2種類, 20%以下1種類) のフライアッシュ (G, L, NおよびO) を用いてプリーディング特性を調べた。また, フライアッシュLを用いて, 水粉体比がプリーディング特性に及ぼす影響についても検討を加えた。

図-1に最適水粉体比におけるプリーディング試験結果を示す。各フライアッシュで水粉体比が大きく異なり, また, 単位水量は一般的なコンクリートに比べて大きいにも関わらずプリーディングの発生量は, 極めて小さい。ただし, 発生量は少ないが, 最適水粉体比が大きい場合, プリーディング量が大きくなる傾向にある。

図-2にフライアッシュLを用いたときの水粉体比とプリーディング量の関係を示す。水粉体比の低減に伴って直線的にプリーディングの発生量は低減しており, 最適水粉体比近傍ではほとんどプリーディングの発生は見られなくなる。

プリーディングは, 粉体に拘束されない自由水の量, 透水係数等に影響されると考えられるが, 最適水粉体比近傍では, 水がほとんど拘束されること, 低水粉体比であるため透水係数が小さいことからプリーディングの発生が見られなくなるものと考えられる。

以上のように, 水粉体比を最適水粉体比となるように選定すれば, フライアッシュの品質が異なってもプリーディングをほとんど発生しない配合を選定することが可能である。

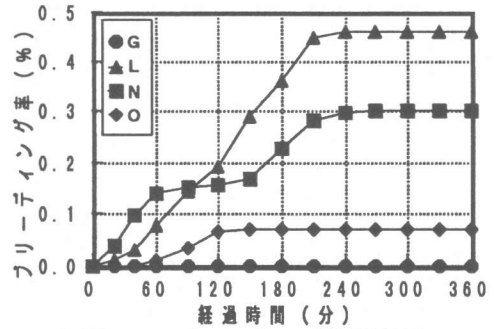


図-1 プリーディング試験結果

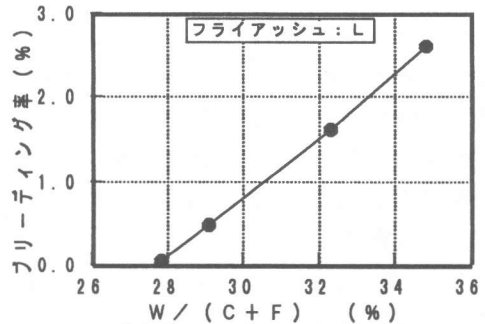


図-2 水粉体比とプリーディング率の関係

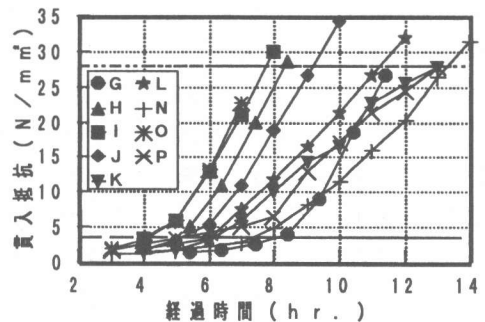


図-3 経過時間と貫入抵抗の関係

(2) 凝結特性

図-3に凝結試験結果を示す。フライアッシュの種類およびフライアッシュの品質から決まる水粉体比によって若干ばらつきが見られるが, 始発時間で4~8時間, 終結時間で8~14時間であり, フライアッシュの多量使用による凝結の大幅な遅延は見られない。図-4に水粉体比と凝結時間の関係を示すが, 例外的なフライアッシュは見られるものの, 全体的には水粉体比が小さいほど凝結時間は早くなる傾向にあると言える。

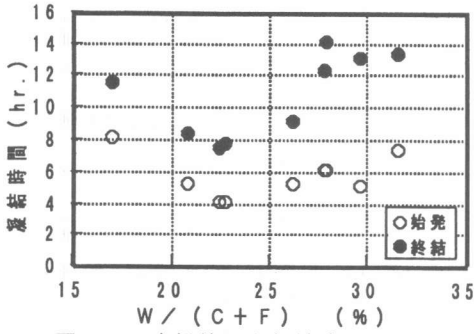


図-4 水粉体比と凝結時間の関係

(3) 断熱温度上昇特性

図-5および図-6にそれぞれ単位セメント量と終局断熱温度上昇量および断熱温度上昇速度の関係を示す。なお、終局断熱温度上昇量および断熱温度上昇速度は、下式を用いて最小二乗法により算定した。

$$T = K \cdot \{1 - \exp(-\alpha(t - t_0))\} \quad (1)$$

ここに、 T ：断熱温度上昇量(°C)、 K ：終局断熱温度上昇量、 α ：断熱温度上昇速度を表す係数(1/day)、 t ：材齢(day)、 t_0 ：温度上昇の遅れ(day)である。

単位セメント量は、200~260kg/m³と比較的小さく、フライアッシュを多量添加しているにも関わらず、終局断熱温度上昇量および断熱温度上昇速度ともセメント量に比して大きな値となっている。これは、硬化促進剤によりフライアッシュの反応が促進されていることに加えて、水粉体比を大幅に低減したことによる微粉末効果の影響も考えられる。このように、終局断熱温度上昇量、断熱温度上昇速度とも大きく、マシブなブロック等の製造時には、温度応力によるひび割れの発生の検討が必要となる場合も考えられる。ただし、図-7に示すように、圧縮強度と終局断熱温度上昇量の間には高い相関が見られ、最適含水比が小さく高い強度の得られるフライアッシュを用いる場合には、セメント添加率が低減でき、温度上昇量も低減される。

いずれにせよ、温度応力ひび割れの発生が懸念される場合も考えられ、今後、水和発熱に関する検討、各種熱特性の把握が必要と言える。

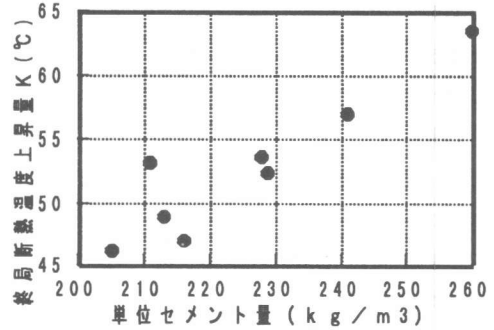


図-5 単位セメント量と断熱温度上昇量の関係

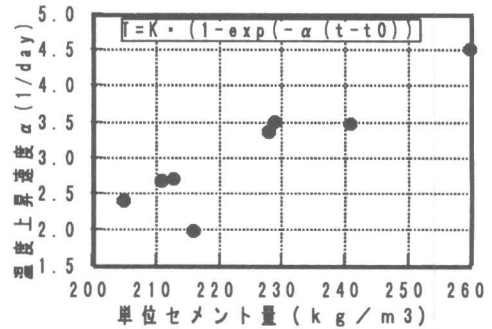


図-6 単位セメント量と温度上昇速度の関係

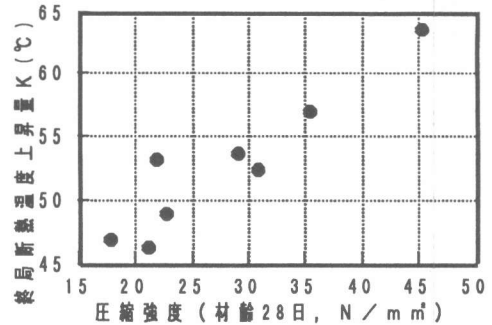


図-7 圧縮強度と終局断熱温度上昇量の関係

3.2 硬化後の特性

(1) 圧縮強度

図-8に材齢と圧縮強度の関係を示す。

若材齢時の強度発現性は低い、材齢に伴う強度増進は大きく、長期的には、かなり高い強度が得られる。このことから、フライアッシュのポゾラン反応が長期にわたって進行していることがわかる。

図-9に材齢と材齢28日における圧縮強度に対する比の関係を示す。各材齢における圧縮強

度の比は、フライアッシュの種類によって差が見られ、材齢28日から365日の強度増加率は、30~100%と大きな範囲でばらついている。

図-10に粉体水比と圧縮強度の関係を示す。若材齢時は、粉体水比と圧縮強度の関係は、ほぼ線形関係(材齢7日、相関係数:0.95)にあり、フライアッシュの種類に関わらず粉体水比から圧縮強度を予測可能であるが、材齢の経過

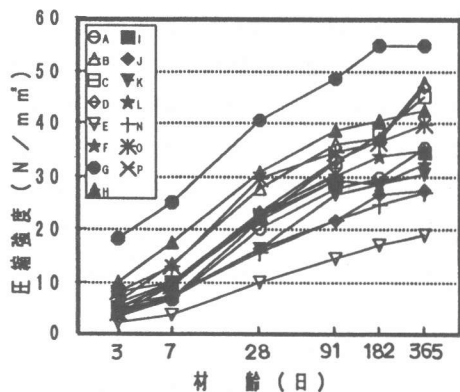


図-8 材齢と圧縮強度の関係

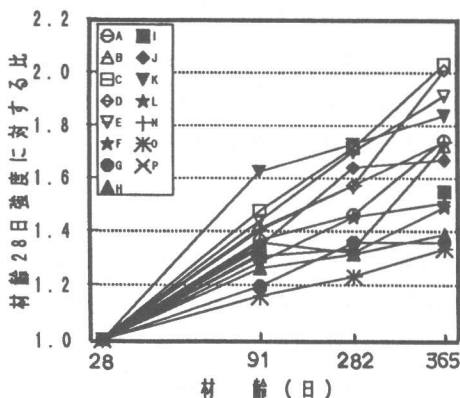


図-9 材齢と材齢28日強度に対する比の関係

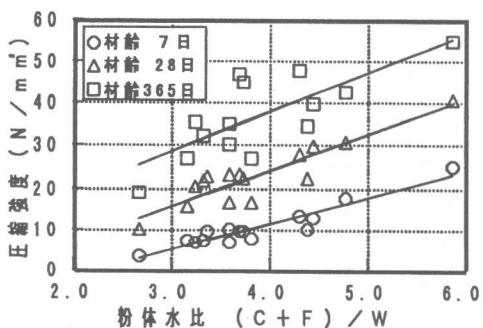


図-10 粉体水比と圧縮強度の関係

に伴ってばらつきが大きくなり(材齢365日、相関係数:0.77)、フライアッシュの品質の影響が大きく見られるようになる。これは、若材齢時の水和の進行が小さい段階では物理的な粉体の充填の程度の影響が大きい、材齢の経過とともに水和の進行の程度、すなわちフライアッシュのポゾラン反応性の影響が大きくなるためであると考えられる。

(2) 引張強度

図-11に圧縮強度と引張強度の関係を示す。なお、一般的なコンクリートと比較するために、図中に土木学会標準示方書で示されている設計用値(以下、土木学会式)を併せて示した。圧縮強度20 N/mm²以下の低強度の領域では、土木学会式とほぼ一致するが、圧縮強度が高くなるに従って土木学会式より小さくなっている。

本硬化体は、セメントに対するフライアッシュの比率が高いため、ほとんどのフライアッシュは、ポゾラン反応することなく残存することになる。これらの水和反応に寄与しないフライアッシュは、物理的な充填効果により強度発現に寄与していると考えられる。圧縮強度に比べて引張強度の増進が小さいのは、上記の物理的な効果のそれぞれの強度に対する寄与の程度が異なるためであると考えられる。

(3) 静ヤング係数

図-12に圧縮強度と静ヤング係数の関係を示す。なお、一般的なコンクリートと比較するために、図中に土木学会標準示方書で示されている設計用値を併せて示した。本硬化体では骨

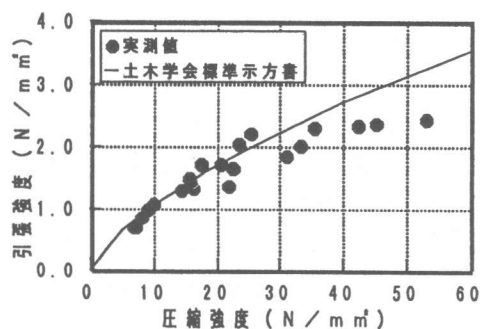


図-11 圧縮強度と引張強度の関係

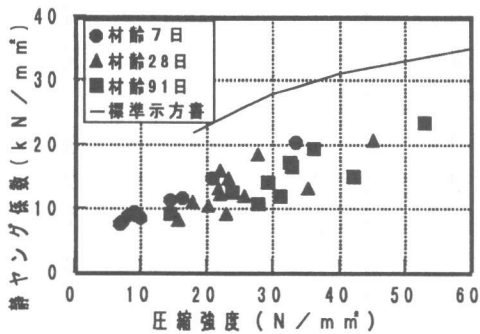


図-1 2 圧縮強度と静ヤング係数の関係

材を用いていないため、一般的なコンクリートに比べて静ヤング係数はかなり小さくなっている。また、圧縮強度と静ヤング係数の関係は、材齢によって異なっており、同一圧縮強度に対する静ヤング係数の比は、長期材齢になるほど小さく、また、ばらつきが大きくなっている。これは、以下に示す強度・剛性発現メカニズムによるものと考えられる。すなわち、圧縮強度は、若材齢時の水和の進行が小さい段階では物理的な粉体の充填の程度に大きく影響を受けるが、材齢の経過とともにフライアッシュのポゾラン反応の進行の程度の影響が大きくなるのに対し、静ヤング係数は、粉体の物理的な充填の程度に大きく影響を受けるためと考えられる。

4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 水粉体比が小さいため、ブリーディングはほとんど生じない。
- (2) フライアッシュを多量に使用しているにもかかわらず、実用上問題となる凝結遅延は見られない。
- (3) 単位セメントが少ないにもかかわらず比較的大きな温度上昇が見られる。
- (4) 初期材齢での強度発現性は若干遅いが、長期材齢での強度増進は大きい。若材齢時の圧縮強度は、粉体水比でほぼ決定するが、長期材齢ではポゾラン反応の影響が大きくなるためフライアッシュの品質の影響が大きくなる。
- (5) 引張強度は、低強度領域では、普通コン

クリートと同等であるが、高強度領域では若干小さくなる。

(6) 骨材を使用していないため、普通コンクリートに比べて静ヤング係数は小さい。

5. あとがき

湿気のある粉体の状態から振動により流体の状態に性状が変化する現象を利用して製造したフライアッシュ硬化体の基本特性を調べた。その結果、本硬化体特有の特性があるものの、今回調査した範囲内では実用上問題のない特性を有していることが明らかとなった。

今後は、常時海水中以外の環境条件における長期耐久性等に関する物性・性能の評価を行い、有効利用の拡大を進めていく予定である。

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)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」におけるフライアッシュ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) 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, 1987. 6
- 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) 長滝重義, 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. 6
- 4) (社)マリノフォーラム21: 石炭灰コンクリート設計・製作マニュアル, MF 2 1 技術資料, pp. 1-28, 1989