

[1038] オートクレーブ養生硬化体 (F-C-W 系) の強度に及ぼす フライアッシュの品質

正会員 ○笠井芳夫 (日本大学生産工学部)
 正会員 松井 勇 (日本大学生産工学部)
 青木敏雄 (日本大学生産工学部)
 正会員 杉本 貢 (竹本油脂第三事業部)

1. はじめに

産業廃棄物の利用に関する研究の一貫として、高炉スラグやフライアッシュのオートクレーブ養生製品への利用について研究してきた。これまでに、スラグ-石膏-石灰系セメントの強度¹⁾、スラグまたは石炭灰-ポルトランドセメント-水系オートクレーブ養生²⁾、スラグまたはフライアッシュ-ポルトランドセメント-水系オートクレーブ養生³⁾およびフライアッシュ-普通ポルトランドセメント-水系オートクレーブ養生⁴⁾について報告した。

本論文は、7種類のフライアッシュを用いたフライアッシュ-普通ポルトランドセメント-水系のオートクレーブ養生に関する実験研究で、オートクレーブ養生硬化体 (F-C-W系) の材令6ヶ月までの強度に及ぼすフライアッシュの品質について検討したものである。

2. 実験方法

(1) 使用材料

セメントは、純普通ポルトランドセメント (敦賀セメント (株) 製) を用いた。

使用したフライアッシュは、北電興業 (株) 砂川工場および江別工場、常磐火力産業 (株)、電発フライアッシュ (株)、中電化工 (株) 新宇部事業所、九電産業 (株) 大牟田事業所および大村事業所の7種類である。これらの化学成分および物理的性質を表-1に示す。これらフライアッシュの特徴を示すと以下のものである。フライアッシュD、E、FはSiO₂が他に比し少ない。D、EはAl₂O₃が他に比し多い。D、FはCaOが他に比し多く、Gは少ない。Fは、SO₃が他に比し多い。E、Gは粉末度ブレン値が他に比し大きく、Aは小さい。またFは単位水量比が他に比し少ない。Aは28日圧縮強度比が他に比し小さく、Gは大きい。

表-1 化学成分及び物理的性質

フライアッシュ	化学成分										物理的性質							
	1)	1)	2)	2)	2)	2)	2)	2)	2)	2)	1)	1)	粉末度 ¹⁾			メチレン	1)	1)
	ig loss (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	水分 (%)	比重 (%)	ブレン (cm ² /g)	80μ 残分 (%)	45μ 残分 (%)	吸収系 (mg/g)	単位水量比 (%)	圧縮28日 (%)	
A	0.32	59.44	26.21	4.52	2.98	1.46	0.06	1.50	2.12	0.13	1.96	2310	8.1	26.0	0.14	97	59.5	
B	0.41	59.18	27.55	4.16	2.45	2.50	0.21	1.10	1.98	0.17	2.14	3720	0.7	4.9	0.15	97	76.6	
C	2.71	54.83	28.90	3.09	5.53	1.68	0.88	1.55	1.40	0.15	2.08	2770	8.0	47.5	0.30	99	72.1	
D	1.20	48.90	29.05	5.68	8.59	2.16	0.57	1.57	0.91	0.18	2.17	3080	8.0	21.8	0.26	98	71.6	
E	2.60	52.07	31.65	3.52	4.96	1.96	0.81	0.18	0.57	0.29	2.26	4530	0.9	4.5	0.29	99	71.6	
F	1.14	49.40	25.70	7.32	8.34	1.40	2.01	1.97	1.76	0.20	2.35	3250	0.4	2.7	0.16	93	72.6	
G	2.78	56.93	26.79	4.08	1.85	1.58	0.69	1.50	2.38	0.17	2.28	5260	1.6	5.3	0.26	97	92.9	
JIS規格	—	45以上	—	—	—	—	—	—	—	1以下	1.95以上	2400以上	—	—	—	102以下	60以上	

註1) JIS A 6201 (フライアッシュ) による。註2) セメント協会標準試験方法による。

表-2 F : C = 0.5 : 0.5 ベースのフロー値と水セメント比

種別	A	B	C	D	E	F	G
水セメント比(%)	27	28	29	24	32	39	39
フロー値 [※]	184	181	175	175	178	176	175

※フロー値は180±10

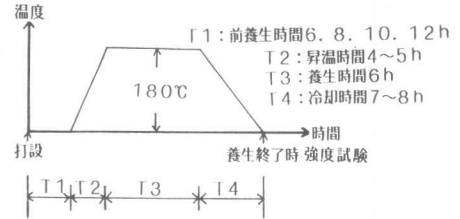


図-1 オートクレーブ養生方法

(2) 調合

フライアッシュ-普通ポルトランドセメント-水系ペーストの調合は、F : Cの混合割合を0.5 : 0.5と一定にし、フロー値を180±10となるように水を加えた。これらの調合を表-2に示す。また加水後、早い時期にオートクレーブ養生するため、メラミン系減水剤にチオ硫酸塩を配合した硬化促進剤をフライアッシュ+セメントの重量に対して3%添加した。

(3) 供試体の形状、寸法および成形方法

供試体は、40×40×160mmの型枠を用いて成形した。

フライアッシュとセメントを粉末の状態で、V型混合機を用いて30分間混合した。フライアッシュ、セメント、水および硬化促進剤はJIS R 5201(セメントの物理試験方法)に準じて練り混ぜ、型枠に詰めて成型した。

(4) 前養生方法

前養生は成形後、供試体を型枠のまま20℃室中で6、8、10および12時間静置して行った。

(5) オートクレーブ養生方法

前養生終了後、型枠のままオートクレーブ養生を行った。オートクレーブ養生は、図-1に示すように、養生温度：180℃、養生時間：6時間とした。

(6) 後養生方法

オートクレーブ養生終了後、脱型して、供試体を温度20℃の空气中で養生した。

(7) 強度試験方法

圧縮および曲げ強度は、JIS R 5201に準じて試験した。試験材令は、前養生終了直後、オートクレーブ養生終了直後(オートクレーブ養生終了後、供試体を7~8時間冷却した後)に試験した。その後は材令28日および6ヶ月で試験した。

3. 結果および考察

(1) 前養生時間と前養生終了時強度との関係

前養生時間と前養生終了時の圧縮および曲げ強度との関係を図-2に例示する。硬化促進剤を用いると、前養生終了時の圧縮および曲げ強度が大きくなるが、フライアッシュの銘柄によって、その程度が異なる。フライアッシュAおよびDは、硬化促進剤を添加することによって、圧縮強度は添加しないものに比べ約1.5~3倍大きくなった。この傾向は、フライアッシュB、C、Gも同様であった。これに比べて、硬化促進剤を添加してもE、Fの強度は、小さかった。

硬化促進剤を用いた場合の前養生時間と前養生終了時の圧縮強度との関係を図-3に示す。フライアッシュAおよびCは、前養生時間が長くなるに従って強度が直線的に大きくなっている。BおよびGは前養生12時間までは強度が若干小さいが、その後、大きくなっている。Dは前養生12時間の強度が最も大きい。フライアッシュEおよびFの強度は他の強度に比べて非常に小さい。特に、Fは前養生時間12時間までの強度が非常に小さい。これは、フライアッシュFに

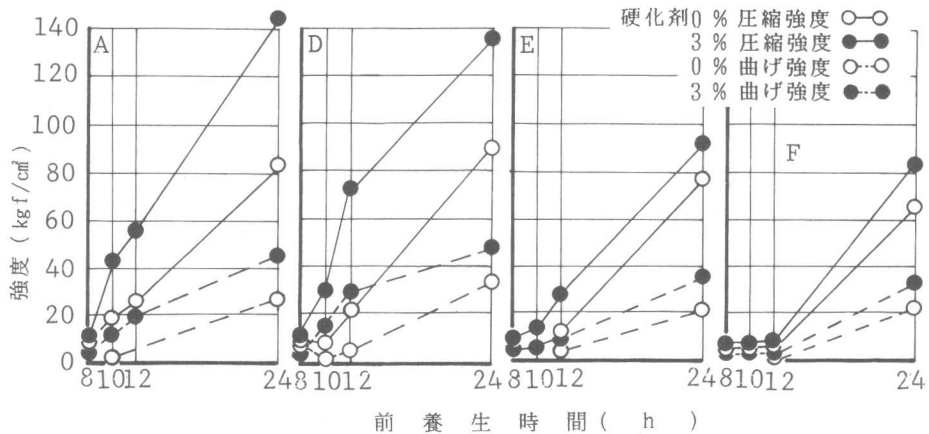


図-2 前養生時間と前養生終了時強度との関係

含まれるCaO(8.34%)およびSO₃(2.01%)が他に比べて多かったが、その他にも微量成分などの影響があるかも知れない。

(2) 材令と圧縮および曲げ強度との関係

材令と圧縮および曲げ強度との関係を図-4に例示する。オートクレーブ養生終了時強度の材令は、前養生時間によって若干異なっているが、前養生時間を8時間としたオートクレーブ養生終了時強度は、他の前養生時間の終了時強度より大きくなっている。

オートクレーブ養生終了時強度は、前養生8時間の場合、強度発現が大きく、前養生時間がこれより長くてもまた短くても、この強度は大きくならない。オートクレーブ養生終了時の強度(図-5参照)は、フライアッシュの銘柄によって、強度発現の様相が異なっている。オートクレーブ養生終了時の強度が500 kgf/cm²を境にして、これより強度が大きいと、以後の強度はほとんど変化しないか、低下する傾向を示し、かつ、強度のばらつきが大きい。これより強度が小さいと、以後の強度は増加する傾向を示して

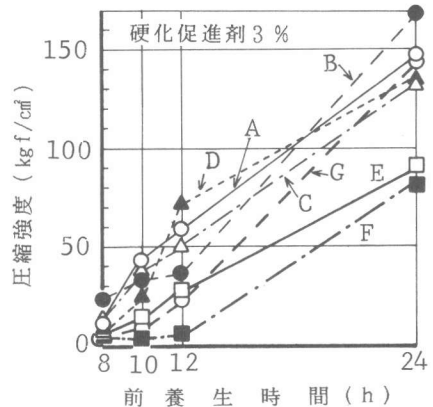


図-3 前養生時間と前養生終了時の圧縮強度との関係

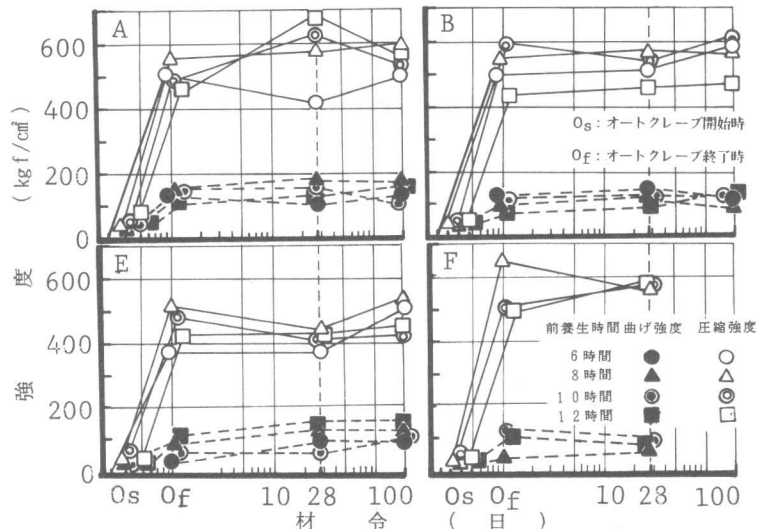


図-4 材令と圧縮および曲げ強度との関係

いる。前者の傾向を示すものうち、強度が低下するものとしてはD、E、Fの前養生時間8時間の強度があり、ほとんど変化しないものはAとBの前養生8時間の強度である。後者の傾向を示すものは、Cの前養生時間12時間の強度、Fの10、12時間およびGの強度などである。

オートクレーブ製品を考える時、オートクレーブ養生終了時の強度とその後の長期強度を考慮する必要がある。

オートクレーブ養生終了時の強度は、筆者らの研究によると³⁾、気泡コンクリート製品のためには、オートクレーブ養生終了時の強度（多量の気泡を連行させない状態の硬化体の強度）は約 500 kgf/cm^2 あれば十分である。オートクレーブ養生終了時の強度が約 500 kgf/cm^2 程度では、長期強度が低下することなく、ばらつきの少ない、安定した強度が得られることが本実験において明らかになった。

(3) 前養生時間とオートクレーブ養生終了後の強度との関係

前養生時間とオートクレーブ養生終了時、およびその後材令28日および材令6ヶ月強度との関係を図-6に示す。前養生時間とオートクレーブ養生終了時強度（図中の○印）との関係は、先項で述べたとおりである。材令28日および材令6ヶ月強度については、フライアッシュAの強度は、前養生時間6時間ではその後強度が低めとなり、8時間以後では28日で強度は最大値をとったが全般に大きめとなった。フライアッシュDはこの反対の傾向を示した。Cは、前養生時間が長くなるに従い強度が大きくなる傾向を示している。Eは、前養生時間が8時間で強度が

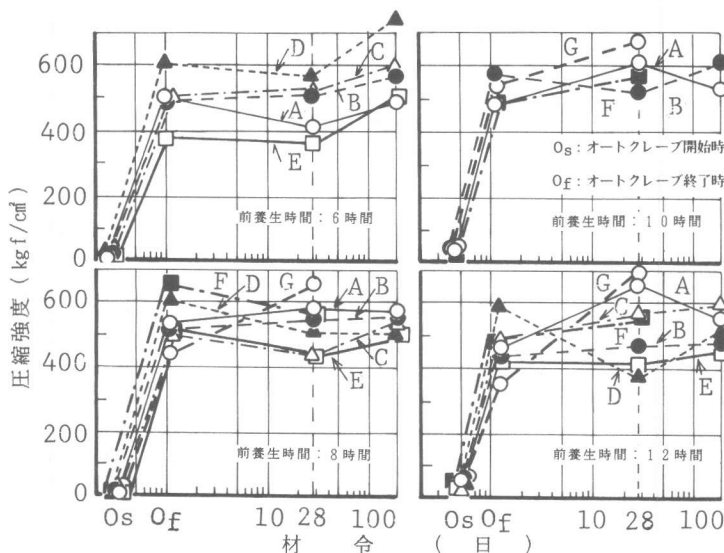


図-5 材令とオートクレーブ養生終了時以後の圧縮強度との関係

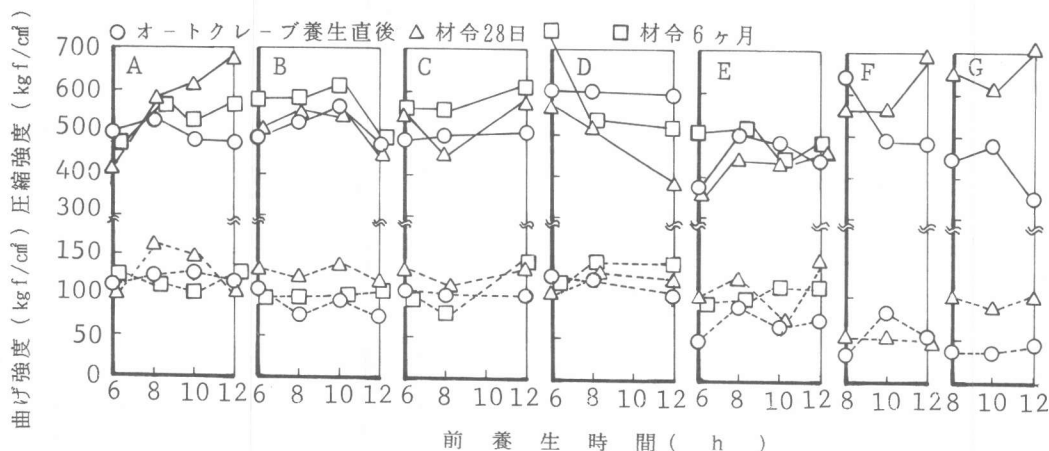


図-6 前養生時間と圧縮および曲げ強度との関係

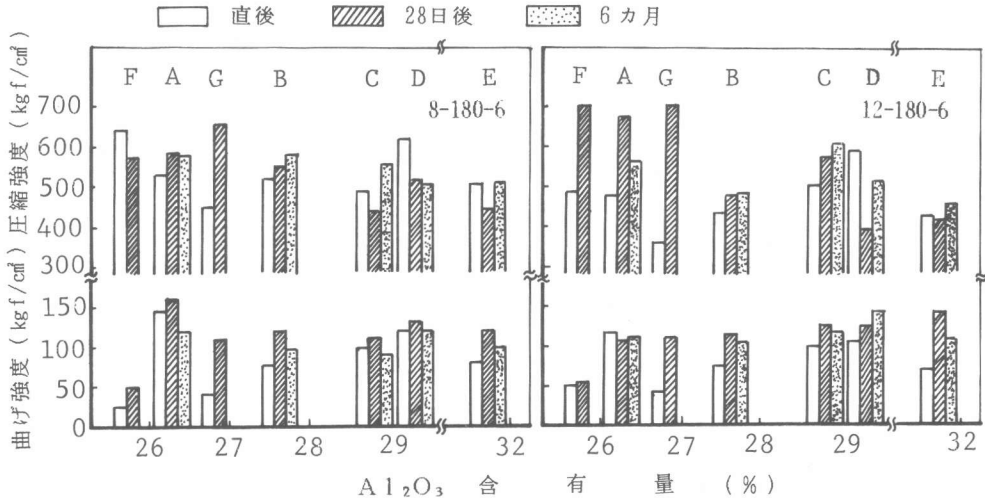


図-7 アルミナ (Al₂O₃) の含有量と圧縮および曲げ強度との関係

大きくなっている。その他のフライアッシュは、顕著な傾向がみられない。

フライアッシュFおよびGは、圧縮強度が大きいにもかかわらず曲げ強度が他に比し小さい。

(4) アルミナの含有量と強度との関係

フライアッシュに含まれているアルミナ (Al₂O₃) の含有量と強度との関係を図-7 に示す。7種類のフライアッシュのうち、アルミナの含有量が27%以下の比較的少ないフライアッシュF、AおよびGは、含有量がこれより多いフライアッシュB、C、DおよびEに比し、圧縮強度が大きくなっている。特に、前養生時間12時間で材令28日強度には、その傾向が顕著に現れている。

(5) CaO/SiO₂ のモル比と圧縮強度との関係

フライアッシュと普通ポルトランドセメントのCaOおよびSiO₂から求めたCaO/SiO₂のモル比と圧縮強度との関係を図-8

に示す。両者の関係は、前養生時間によって相違している。前養生時間が6時間の場合は、このモル比が大きくなるに従い、圧縮強度が大きくなっている。しかし、前養生時間が8時間および10時間の圧縮強度は、モル比が1.0付近で小さくなる傾向を示しており、モル比が0.9あるいは1.1で大きくなっている。また前養生時間が12時間になると、モル比が0.9~1.1の範囲では、圧縮強度は、それほど変化しない。なお、このモル比の算定はフライアッシュ中のSiO₂およびCaOの全量を用いて算定したものである。

(6) 各種フライアッシュの比較

○A △B □C ●D ▲E ■F ◎G
○材令0日 ○28日 ○6ヶ月

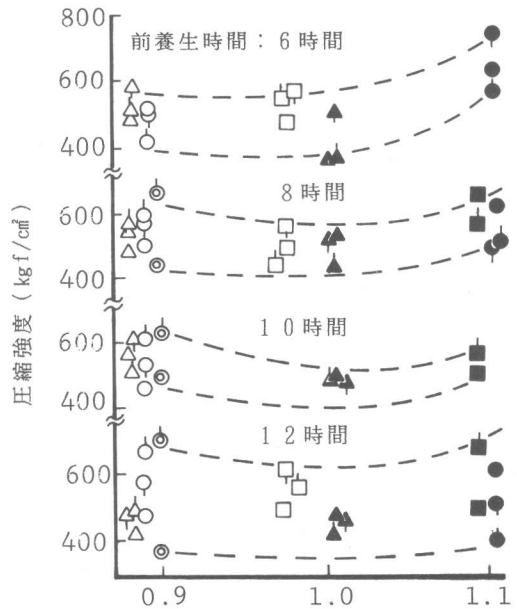


図-8 モル比 CaO/SiO₂ CaO/SiO₂のモル比と圧縮強度との関係

これまでの試験結果から、今回試験した7種類のフライアッシュを比較すると表-3のようである。フライアッシュFは前養生終了時強度が小さい。相性のよい硬化促進剤が見当たらない限り気泡コンクリートとして用いることは難しい。フライアッシュDおよびFは、オートクレーブ養生終了時強度は大きい、長期強度がばらついている。これらのフライアッシュは、他のフライアッシュに比べて、CaO/SiO₂のモル比が大きい。

表-3 各種フライアッシュの比較

項目	フライアッシュの種類						
	A	B	C	D	E	F	G
Al ₂ O ₃ の含有量	小	中	大	大	大	小	小
CaO/SiO ₂ モル比	小	小	中	大	中	大	小
SO ₃ 含有量	小	小	中	中	中	大	中
ブレン値	小	中	小	中	大	中	大
F-C-Wペー ストのW/C	中	中	中	小	中	大	大
前養生(8時間) 終了時強度	大	大	大	大	中	小	大
オートクレーブ 養生終了時強度	中	中	中	大	小	大	小
長期強度	ばらつく	同じ	増	ばらつく	ばらつく	ばらつく	増
判定	良	優	優	良	不可	不可	不可

フライアッシュEは、オートクレーブ養生終了時の強度が小さくかつ長期強度がばらついている。フライアッシュA、BおよびCはオートクレーブ養生終了時強度は中位であるが、長期強度が養生終了時強度と同程度か増加する傾向を示している。これらのフライアッシュは、CaO/SiO₂のモル比が中位か小さい。この他、F、Eは同一フロー値を得るW/C+Fが非常に大きい。以上の結果から、オートクレーブ製品の製造に適しているフライアッシュを判定すると、フライアッシュBおよびCは優、AおよびDは良、E、FおよびGは不可となろう。

4. むすび

今回行った実験結果を要約すると、以下のようである。

- (1) フライアッシュFの前養生終了時強度は極めて小さかった。この理由は明らかでない。
 - (2) オートクレーブ養生終了時の強度は、前養生時間8時間で最も大きくなる。
 - (3) オートクレーブ養生後の長期強度は、養生終了時の強度が500kg/cm²を越えると、低下したり、ばらつきが大きくなったりする。
 - (4) 長期強度に及ぼす前養生時間の影響は、フライアッシュの種類によって相違した。AおよびDのように前養生時間によって特異な傾向を示すもの、Cのように前養生時間が長くなるに従い長期強度が大きくなる傾向を示すもの、F、Gのように前養生時間が長くなるとオートクレーブ養生終了時の強度は小さくなったが、長期強度は大きくなるものなどがあつた。
 - (5) Al₂O₃の含有量が多いフライアッシュは、強度が小さめとなった。
 - (6) フライアッシュとポルトランドセメントから求めたCaO/SiO₂のモル比が0.9および1.1程度で強度が大きくなり、1.0程度では強度が若干小さくなった。この理由は明らかでない。
- 〈参考文献〉 1) 笠井芳夫、近藤勝哉、スラグセッコウ石灰系セメントの強度に関する研究、第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp.57~60、1981。2) 笠井芳夫、高炉水砕スラグ、石炭灰のオートクレーブ養生、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.77~78、1984。3) Y.KASAI, I.MATSUI, M.OZAWA and T.SAITO, Utilization of Fly Ash and Granulated Blast Furnace Slag to Autoclaved Light Weight Cellular Concrete, 1985 Beijing International Symposium on Cement and Concrete, pp.304~317, 1985。4) 笠井芳夫、松井勇、長野基司、嵩英雄、各種フライアッシュ-普通ポルトランドセメント-水系オートクレーブ養生、第7回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp.201~204、1985。