

論文

[1004] フライアッシュの品質変動がコンクリート性状に及ぼす影響について

正会員○桑野陵一（前田建設工業）

正会員 篠田佳男（前田建設工業）

窪 泰浩（東京電力）

正会員 今井澄雄（東京電力）

1. まえがき

フライアッシュはコンクリートの流動性、長期強度の改善、水和熱の低減、および耐久性の向上等の効果を有することから、コンクリート用混和材として幅広く利用されている。しかし、最近のフライアッシュは、火力発電所において、海外炭の使用や排ガス環境規制等の実施により、その品質の低下および変動が大きいといわれている。そのため、コンクリートの製造という観点から、簡易で、かつ精度の高いフライアッシュの品質判定手法の確立が強く望まれている。また、品質の異なるフライアッシュを使用した場合、コンクリートの性状は、フレッシュ時のみならず硬化後の長期的物性についても影響を受ける。

本研究は、このような背景を考慮し、品質の変動するフライアッシュを混和材として使用する際のフライアッシュの品質判定手法を確立し、並びにコンクリートの空気泡分布、および細孔容積等による耐凍害性の評価を加えた長期的な物性を把握することを目的に実施したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

フライアッシュは、表-1に示すように、J火力発電所において生成された発電負荷、炉内温度、および炭種の異なる3種類のものとした。また、セメントはN社製普通ポルトランドセメントを、細骨材はK地区産の陸砂を、粗骨材はN地区産の川砂利を、混和剤はY社製AE剤をそれぞれ使用した。

表-1 フライアッシュの種類

種 別	A	B	C
発電負荷 (MW)	125 ~ 250	200 ~ 600	200 ~ 600
炉内温度 (℃)	1,550	1,350	1,450
炭 種	国内炭100%	国内炭1 : 海外炭1	国内炭2 : 海外炭1

2.2 フライアッシュの品質判定手法に関する試験

(1) フライアッシュの試料採取方法

フライアッシュは、その種類毎に、コンクリートプラントの計量器より直接採取した。なお、サンプリングは、コンクリートの製造量で50m³程度に1回の割合とし、連続して7回それぞれ採取した。

(2) 試験内容

フライアッシュの品質試験は、長瀧らが提案しているみつかさ比重、 W_{20} [1]、メチレンブルー吸着量、強熱減量、および簡易みつかさ比重とした。ここで、簡易みつかさ比重試験とは、モルタル用フローテーブルをベースとし、みつかさ比重試験では衝撃回数を2000回としているのに対して、2層70回と衝撃回数を低減し、試験時間を大幅に短縮したものである。

2. 3 コンクリートの性状に関する試験

(1) コンクリートの配合

コンクリートは、表-2に示すように、単位結合材量316 kg、水結合材比50%の配合5種類のものとした。なお、配合種別記号は、順にフライアッシュの種類、混入割合、およびAE剤使用の有無を表している。

表-2 コンクリートの配合条件

配合種別	打設時期	FA	G _{max} (mm)	SL (cm)	Air (%)	F/(C+F) (%)	W/(C+F) (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
									V	C	F	S	G
A-20-AE	H1.06.13	A	25	12.5	5.5	20	50	34	158	253	63	601	1232
B-20-AE		B											
C-20-AE	H1.11.15	C	25	12.5	1.5	0	50	34	158	253	63	601	1232
C-20-Non-AE	H1.11.17												
FA-0-AE													

(2) フライアッシュの化学成分

表-3はコンクリートに混入したフライアッシュの化学成分の試験結果を示したものである。

表-3 フライアッシュの化学成分

種 別	A	B	C
水分	0.02	0.04	0.07
強熱減量	0.09	3.40	2.01
SiO ₂	54.77	62.83	56.87
Al ₂ O ₃	25.23	23.40	27.77
Fe ₂ O ₃	4.87	3.73	4.03
CaO	11.17	4.03	6.27
MgO	1.43	0.77	0.93
SO ₃	0.08	0.17	0.17

(3) 養生条件

養生は、標準養生と暴露養生に分けて実施した。ここで暴露養生は、図-1に示すように、マッシュなコンクリート断面の一部を代表するように周囲に断熱材をほどこした一面暴露養生とした。

(4) 試験内容

フレッシュコンクリートは、スランプ、空気量、および練り上がり温度について測定した。硬化コンクリートは、圧縮強度、細孔容積、および空気泡分布について、すべての配合条件および暴露条件で測定した。ここで細孔容積は水銀圧入法により測定し、空気泡分布はASTM C457 リニアトラバース法に準拠し、気泡数、気泡弦長、および気泡間隔係数を対象に測定した。さらに、凍結融解試験はJIS原案の水中急速凍結法に準拠し、表-2に示すC-20-AE、C-20-Non-AE、FA-0-AEの3種類の他に、材令1年の5種類の暴露試験体よりコア採取した円柱供試体についても併せて実施した。表-4にコンクリートの試験項目と試験材令の一覧表を示す。

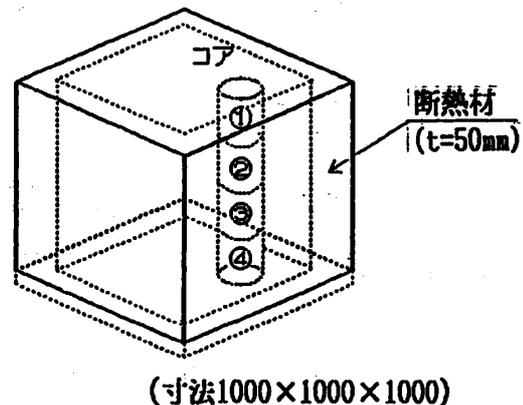


図-1 暴露試験体

3. 実験結果と考察

3.1 フライアッシュの品質判定手法

表-5は、フライアッシュの品質試験結果を示したものである。フライアッシュの品質を判定するための代表的な指標である強熱減量は、平均値でみると、A種が0.157%、B種が3.737%

表-4 コンクリートの試験項目および試験材令一覧表

配合種別	養生条件	圧縮強度								細孔容積				凍結融解試験				空気泡分布
		7d	28d	91d	6m	1y	2y	3y	5y	28d	91d	6m	1y	28d	91d	6m	1y	
A-20-AE	標準	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●					●
	暴露	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●					●
B-20-AE	標準	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●					●
	暴露	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●					●
C-20-AE	標準	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	暴露	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●
C-20-Non. AE	標準	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	暴露	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●
FA-0-AE	標準	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	暴露	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●

C種が 1.980%となっている。また、バラツキを標準偏差でみると、A種が 0.042%、B種が 0.228%、C種が 0.022%となっている。この結果だけを見ても、A種は品質が良好であり、B種は変動も大きくA種やC種に比べて品質の劣ることが推定できる。

図-2は、みつかさ比重と簡易みつかさ比重の関係を示したものである。みつかさ比重と簡易みつかさ比重は強い相関があるといえる。また、図-3は、所定の空気量を連行するのに必要なAE剤量と簡易みつかさ比重の関係を示したものである。B種フライアッシュを使用した場合は、A種およびC種を使用した場合に比較して、約3倍のAE剤量を必要とすることがわかる。

今回の結果から、簡易みつかさ比重は、実用上十分な精度で所要のAE剤量を算定できることに加えて、試験時間の短縮化を考えると、強熱減量やみつかさ比重等の他の手法に比較して、日常の品質管理への適用が、さらに有効なものであることが認められる。

表-5 フライアッシュの品質試験結果

FA種類	みつかさ比重	簡易みつかさ比重	強熱減量(%)	M/B吸着率(mg/g)	W ₂₀ (%)
A	1.42	1.22	0.19	0.18	37.1
	1.42	1.23	0.20	0.05	37.5
	1.45	1.23	0.16	0.08	36.7
	1.45	1.23	0.19	0.12	36.5
	1.45	1.23	0.16	0.10	36.6
	1.43	1.22	0.11	0.18	37.4
	1.44	1.22	0.09	0.10	37.3
	平均	1.437	1.226	0.157	0.116
標準偏差	0.014	0.005	0.042	0.049	0.41
B	1.13	0.84	3.81	0.60	65.4
	1.12	0.82	3.95	0.56	64.9
	1.14	0.84	4.01	0.49	64.8
	1.16	0.81	3.84	0.61	64.6
	1.10	0.82	3.65	0.64	63.9
	1.14	0.83	3.50	0.56	63.3
	1.17	0.84	3.40	0.60	63.2
	平均	1.137	0.829	3.737	0.563
標準偏差	0.024	0.012	0.228	0.046	0.84
C	1.37	1.14	1.85	0.11	39.9
	1.37	1.09	1.97	0.12	38.8
	1.36	1.05	2.01	0.15	40.1
	1.35	1.09	1.98	0.11	40.2
	1.36	1.07	1.97	0.14	40.7
	1.35	1.05	1.97	0.16	40.8
	1.35	1.07	2.01	0.14	41.2
	平均	1.359	1.080	1.980	0.133
標準偏差	0.009	0.031	0.022	0.020	0.52

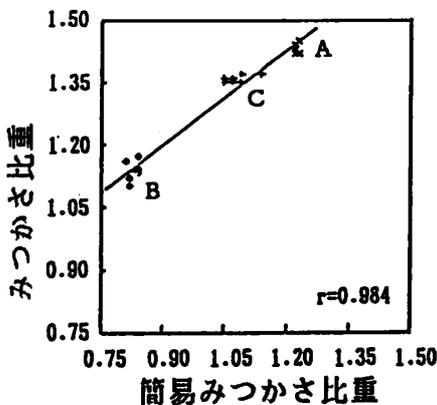


図-2 簡易みつかさ比重とみつかさ比重の関係

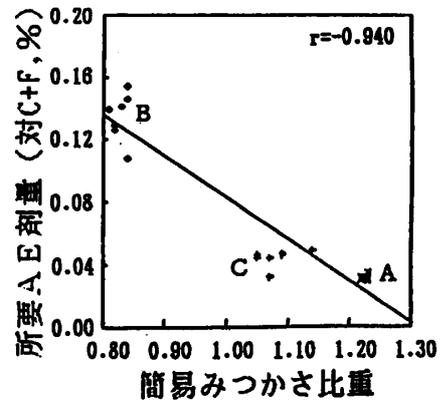


図-3 簡易みつかさ比重と所要AE剤量の関係

3.2 コンクリートの性状

(1) 圧縮強度

図-4は、円柱供試体（ $\phi 10 \times 20\text{cm}$ ）の標準養生における材令と圧縮強度の関係を示したものである。フライアッシュを混入したコンクリートは、フライアッシュの種類にかかわらず、材令28日まではほぼ同じ強度発現性状を示している。しかし、材令の経過とともに、フライアッシュの種類の違いによる強度発現の差がでてきている。B-20-AE およびC-20-AE が、材令半年以降にFA-0-AE と同程度の強度を発現しているのに対し、A-20-AE は材令91日までの強度の伸びも小さく、材令半年から材令1年までの強度増進はみられなかった。これらを考えると、フライアッシュのポゾラン反応は材令28日以降にその効果が現われ、また、フライアッシュの品質の違いにより、その効果に差があると考えられる。一般に、フライアッシュの活性成分はシリカ（ SiO_2 ）とアルミナ（ Al_2O_3 ）であるといわれている[2]。表-3より、シリカとアルミナを加算すると、A種が80.0%、B種が86.2%、C種が84.6%となっており、長期強度の発現性状をある程度裏付けている。

図-5は、暴露試験体よりコア採取した供試体の材令と圧縮強度の関係を示したものである。強度発現性状は、A-20-AE とB-20-AE は材令91日以降は小さく、逆に、C-20-AE とFA-0-AE は材令91日以降に大きくなっている。これは、フライアッシュの品質の違いによる影響ではなく、暴露試験体の作製時期の違い、すなわち養生条件の影響によるものである。また、A-20-AE とB-20-AE はいずれの材令においても約 45kgf/cm^2 の強度差がある。これは、B種フライアッシュの強熱減量が大きいことから、未燃カーボンによる空気量損失の差が主原因と考えられる。

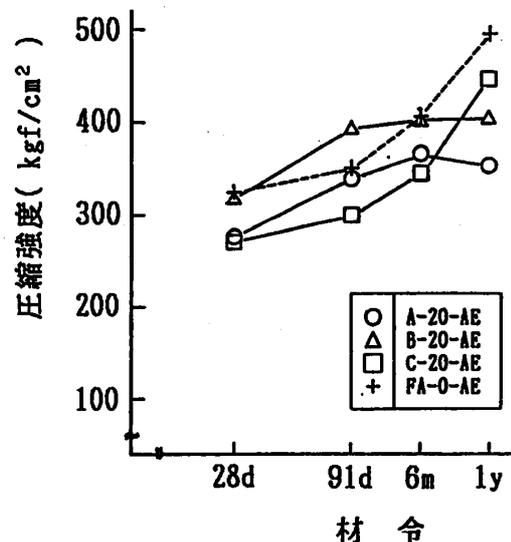
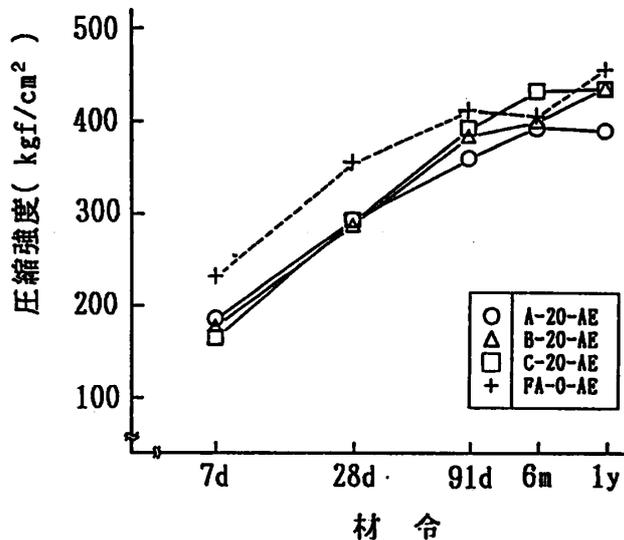


図-4 材令と圧縮強度の関係（標準養生） 図-5 材令と圧縮強度の関係（暴露養生）

(2) 耐凍害性

表-6に硬化コンクリートの空気泡分布の試験結果を示す。暴露養生の空気泡分布は、標準養生に比べると、気泡数は多く、気泡間隔係数は小さい値を示している。また、B-20-AE は、A-20-AE およびC-20-AE に比較して、気泡数は少なく、気泡間隔係数は大きくなっており、これは前述した空気量の損失の影響と考えられる。

図-6は、標準養生における材令と細孔容積の関係を示したものである。今回の試験結果は、

一試料の測定結果をそのまま試験値として代表させているので、試験誤差の影響をまぬがれていない。しかし、全配合とも、材令とともに細孔容積が減少する傾向にあるといえる。また、フライアッシュを混入したコンクリートの方が減少量が多いよううかがえ、ポゾラン反応による水和組織の緻密化が進行していると推測される。図-7は、暴露養生における材令と細孔容積の関係を示したものである。細孔容積の減少量は、標準養生に比べると暴露養生の方が少ないようである。また、フライアッシュを混入したコンクリートは、混入しないコンクリートに比べると養生条件によらず、細孔容積は大きいようである。

表-6 コンクリートの空気泡分布

配 合	養生	気泡数	気泡平均径長 (μm)	空気量 (%)	気泡間隔係数 (μm)
A-20-AE	暴露	1490	127	6.92	119
	標準	885	146	4.74	177
B-20-AE	暴露	956	129	4.58	160
	標準	696	174	4.44	218
C-20-AE	暴露	1431	134	7.08	126
	標準	956	140	4.91	165
C-20-Non-AE	暴露	371	190	2.57	304
	標準	366	163	2.18	279
FA-0-AE	暴露	1152	132	5.49	147
	標準	671	122	3.01	183

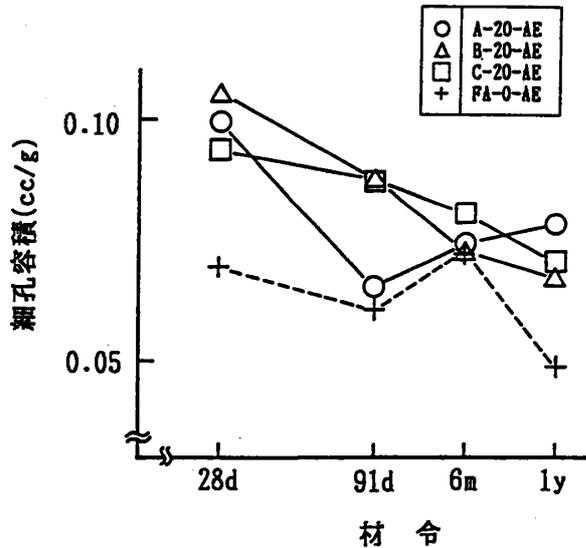


図-6 材令と細孔容積の関係 (標準養生)

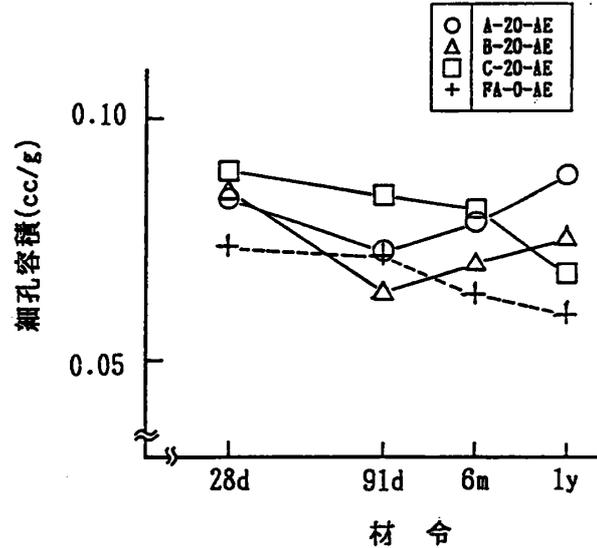


図-7 材令と細孔容積の関係 (暴露養生)

図-8は、材令28日と材令半年の標準養生における凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係を示したものである。フライアッシュの混入の有無にかかわらず、耐凍害性はほぼ同等であると言える。また、材令の経過に伴い、AEコンクリートのみならずプレーンコンクリートも同様に、耐凍害性が向上している。これは、水和組織の緻密化による強度増進、並び

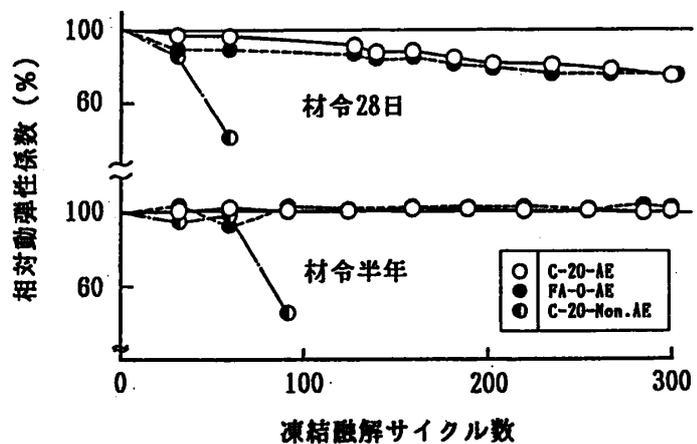


図-8 凍結融解試験結果 (標準養生)

に細孔径の縮小に伴う孔隙水の凍結温度の低下によるもの[3]と考えられる。図-9は、材令1年の暴露試験体よりコア採取した円柱供試体の凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係を示したものである。空気量損失の大きいB-20-AEは、300サイクル時で相対動弾性係数96.6%を得ており、十分な耐凍害性を有していることを確認している。

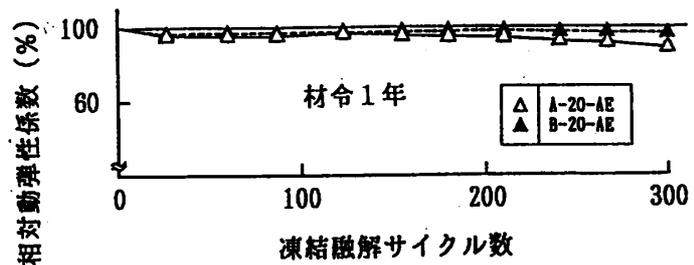


図-9 凍結融解試験結果 (暴露養生)

これらを、気泡間隔係数と関連づけてみると、気泡間隔係数が $250\mu\text{m}$ 以下ならば、フライアッシュの有無にかかわらず、十分な耐凍害性を有しているといえる。

4. まとめ

本研究をまとめると以下ようになる。

- (1) 簡易みつかさ比重試験は、フライアッシュを混入したコンクリートの安定供給に反映するフライアッシュの品質判定手法としての実用性が確認された。
- (2) フライアッシュは、ポゾラン反応により、コンクリートの圧縮強度を増進させるが、フライアッシュの品質の違いにより、その効果も異なる。
- (3) 未燃カーボンの多いフライアッシュを混入したコンクリートは、空気量の損失が大きく、硬化後の残存空気量は少ないが、製造時に所要の空気量を連行すれば、耐凍害性を十分に確保できる。
- (4) コンクリートにフライアッシュを混入すると、細孔容積は多少大きくなるが、ポゾラン反応の進行に伴い減少し、耐凍害性の向上に寄与する。
- (5) コンクリートは、フライアッシュ混入の有無にかかわらず、気泡間隔係数が $250\mu\text{m}$ 以下ならば、十分な耐凍害性を有している。

[参考文献]

- [1] 長瀧、大賀、増田、谷：フライアッシュコンクリートの品質管理手法に関する研究、第9回コンクリート工学年次論文報告集、1987
- [2] 国分正胤：フライアッシュおよびフライアッシュセメント、セメント・コンクリート、No.267、1969
- [3] 鎌田英治：凍結融解作用を受けたコンクリートの挙動と細孔構造、セメント・コンクリート、No.460、1985
- [4] 長瀧、大賀、増田、内田：フライアッシュコンクリートの空気連行性と耐凍害性、第9回コンクリート工学年次論文報告集、1987
- [5] 後藤誠史：セメント硬化体と空隙 (その1、その2)、セメント・コンクリート、No.462、No.464、1985