

論文 高粉末度フライアッシュを使用した高強度コンクリートの 長期強度・中性化及び耐火性

手島則夫*1・榊田佳寛*2・中村成春*3

要旨：本研究は、高粉末度フライアッシュを混入した高強度コンクリートの材齢1年までの長期圧縮強度、促進中性化ならびに耐火性を実験的に検討したものである。その結果、以下が明らかになった。フライアッシュの混入量が増加すると圧縮強度は低下するが、長期湿潤養生によってフライアッシュ混入の効果が現れ、強度低下が緩和される。特に高粉末度のフライアッシュに顕著に現れる。中性化速度は、同一水結合材比ではフライアッシュの混入量の増加に伴い早くなるが、促進中性化試験開始時の圧縮強度が同じであれば中性化速度も同じになる。耐火性は、高粉末度フライアッシュを混入すると爆裂の程度が大きくなる。
キーワード：高粉末度フライアッシュ、高強度コンクリート、圧縮強度、中性化、耐火性

1.はじめに

近年、エネルギー源を多方面から確保するために石炭火力発電が見直され¹⁾、それに伴い石炭灰の増加が予想され、環境を配慮した資源再利用システムの拡大が望まれている。石炭灰のうちフライアッシュは、従来よりコンクリート用混和材に使用され、JIS規格も制定されている。しかしながら、発電所のNOx規制、海外炭への移行等によりJIS規格の制定時からかなり品質の変化したフライアッシュが発生し²⁾、その品質の変動が問題となっている。一方、集塵技術の向上により、種々の粒度に分級された高粉末度フライアッシュの製品化など、フライアッシュの高品質化が図られている。しかし、高粉末度フライアッシュの利用がコンクリートの性質に及ぼす影響については不明な点が多い。

一方、高強度・高流動・高耐久などの高性能コンクリートが段階的に実用化され、流動性の改善、長期強度の増大、水和熱低減効果などが期待³⁾できるフライアッシュの高強度コンクリートへの適用が望まれている。しかし、高粉末度フライアッシュを混入した高強度コンクリートに関する研究^{4) 5)}は比較的少なく、長期

物性を含めた高強度コンクリートの諸性質を把握することは重要である。

本研究は、高粉末度フライアッシュを混入した高強度コンクリートの材齢1年までの長期圧縮強度、促進中性化ならびに耐火性を検討したものであり、これらの諸物性に及ぼすフライアッシュの影響を明らかにしたものである。

2.実験概要

2.1 実験の要因と水準

表-1に実験の要因と水準を示す。フライアッシュは、粉末度が異なるフライアッシュB及びフライアッシュDの2銘柄を用い、水結合材比W/Bを4段階に設定し、2銘柄のフライアッシュを各々混入した。混入量の水準は、低W/B条件ほど多段的になるように設定した。ま

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
フライアッシュ銘柄	高粉末度B：粉末度6610cm ² /g 中粉末度D：粉末度4030cm ² /g
水結合材比W/B	26、31、38、49
フライアッシュ混入量(kg/m ³)	W/B=26%条件；0、100、200、300 W/B=31%条件；0、100、200 W/B=38%条件；0、100 W/B=49%条件；0

*1 鹿島建設株式会社 (元宇都宮大学大学院生) 工修 (正会員)

*2 宇都宮大学工学部建設学科 教授・工博 (正会員)

*3 宇都宮大学工学部建設学科 助手・工博 (正会員)

た、フライアッシュ無混入のコンクリート（以下、記号Pで表す）と比較することで、フライアッシュの混入効果を検討した。

2.2 実験項目及び方法

実験の項目は、材齢1年までの長期圧縮強度、促進中性化及び耐火性とした。

圧縮強度は、 $\phi 10 \times 20$ cm円柱供試体を用いて JIS A 1108により測定した。試験条件は、標準養生供試体で材齢7, 28, 91, 365日、気中養生供試体で材齢28, 91, 365日とした。なお、気中養生供試体は7日間標準養生後、 $20^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{RH}$ の室内で保存した。

促進中性化は $10 \times 10 \times 40$ cm角柱供試体を用いて、日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・付録」により条件Ⅰ及び条件Ⅱについて測定した。条件Ⅰは1週間標準養生後、4週間 $20^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{RH}$ 気中で保存し、 $20^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{RH} \cdot \text{CO}_2$ 濃度5%にて中性化期間4, 8, 13, 44週で測定し、条件Ⅱは26週間標準養生後、21週間 $20^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{RH}$ で気中保存し、 $20^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{RH} \cdot \text{CO}_2$ 濃度5%にて中性化期間4, 8, 13, 19, 26週で測定した。

耐火性は $\phi 15 \times 30$ cm供試体を用いて、JIS A 1304に規定する標準加熱曲線により加熱し、爆裂状況を評価した。供試体は28日間標準養生後 $20^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{RH}$ 室内に保存し、保存期間3, 6, 12ヶ月で耐火試験及び含水率の測定を行った。

2.3 使用材料

表一2にフライアッシュの品質を示す。本実験で使用したフライアッシュは、同一プラントの電気集塵器にて採取されたもので、強制渦遠心分級法により分級されたものである。骨材は、鬼怒川産川砂（表乾比重2.60, 吸水率2.02%, 粗粒率2.61）と岩瀬産硬質砂岩砕石（表乾比重2.66, 吸水率0.65%, 実積率60.2%）を使用した。セメントは、3社等量混合した普通ポルトランドセメントを使用した。混和剤は、ポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤を使用し、空気量調整剤に高アルキルカルボン酸系AE剤を併用した。

表一2 フライアッシュの品質

FA 銘柄	比重	粉末度 (cm^2/g)	50%平均 粒径 (μm)	強熱 減量 (%)	フロー 値比 (%)	活性度 指数 (28日)
B	2.4	6610	4.2	3.16	106	99
D	2.3	4030	10.2	2.26	102	91

表一3 コンクリートの調合及びフレッシュコンクリートの性状

記号	単位置量 (kg/m ³)					混和剤*		スラン プ (cm)	空気 量 (%)
	FA	W	C	S	G	主剤	助剤		
P260	0	170	650	637	928	1.5	1.0	22.7	2.4
P310	0	170	550	689	960	1.0	0.0	21.3	2.2
P380	0	170	450	702	992	0.9	3.0	21.2	4.9
P490	0	170	350	783	992	1.2	3.0	21.3	4.1
B261	100	170	550	601	928	1.2	2.0	22.8	2.2
B262	200	170	450	575	928	1.2	3.5	23.7	2.6
B263	300	170	350	549	928	1.2	4.5	23.2	3.0
B311	100	170	450	653	960	0.8	2.0	22.0	2.1
B312	200	170	350	624	960	0.9	3.0	22.0	2.1
B381	100	170	350	676	992	0.9	10.0	21.8	3.3
D261	100	170	550	606	928	1.4	1.7	22.5	2.8
D262	200	170	450	577	928	1.3	3.0	23.3	3.4
D263	300	170	350	543	928	1.3	4.0	24.7	2.8
D311	100	170	450	658	960	1.0	0.0	22.8	2.0
D312	200	170	350	627	960	1.0	0.1	22.5	1.9
D381	100	170	350	668	992	0.9	10.0	22.0	5.0

主剤（高性能AE減水剤）；セメント質量に対する%添加率（C%）
助剤（AE剤）；セメント質量に対する0.001%添加率（C*0.001%）

2.4 使用コンクリートの調合

表一3にコンクリートの調合を示す。単位水量は、全調合で $170\text{kg}/\text{m}^3$ 一定にし、W/B毎に単位粗骨材かさ容積を一定とした。W/B=26, 31%では、スランプが 23 ± 2 cm, 空気量が $3.0 \pm 1.5\%$ に、W/B=38, 49%では、スランプが 21 ± 2 cm, 空気量が $4.5 \pm 1.5\%$ になるように、混和剤の添加により調整した。

3. 実験結果及び考察

3.1 圧縮強度

表一4に圧縮強度試験の結果を示す。また、図一1に養生別に材齢28日の圧縮強度に対する各材齢の圧縮強度比を示す。図中のaは、W/B=26, 31及び38%でフライアッシュ無混入の場合を、bは同W/B条件でフライアッシュBの混入量 $100\text{kg}/\text{m}^3$ の場合を、cはW/B=26及び31%でフライアッシュBの混入量 $200\text{kg}/\text{m}^3$ の場

表-4 圧縮強度試験結果

記号	圧縮強度 (MPa)						
	標準養生				気中養生		
	7日	28日	91日	365日	28日	91日	365日
P260	75.1	96.4	98.0	104.9	86.7	97.0	90.9
P310	64.8	84.0	89.8	99.1	80.1	87.4	79.7
P380	45.0	57.5	66.5	74.1	58.6	61.4	58.1
P490	35.1	44.7	52.2	53.4	51.1	51.6	44.8
B261	69.5	88.4	94.5	113.0	89.7	93.3	86.1
B262	58.5	87.3	99.0	98.4	82.9	88.7	83.2
B263	47.4	71.8	87.0	90.7	71.3	73.9	75.9
B311	52.5	71.4	85.6	90.9	72.1	73.5	68.0
B312	45.1	65.5	77.4	86.5	66.8	74.1	57.5
B381	38.3	53.1	68.9	82.4	55.2	59.6	52.4
D261	71.1	87.1	104.0	108.5	90.6	96.8	88.5
D262	59.3	80.4	97.1	106.4	80.8	83.9	79.6
D263	48.0	67.7	87.5	94.5	70.8	76.1	66.2
D311	56.1	75.3	88.4	102.1	78.4	84.4	77.0
D312	43.1	64.2	78.1	93.9	65.9	70.8	54.5
D381	35.1	52.6	62.0	71.5	54.1	55.6	51.7

合を、dはW/B=26%でフライアッシュBの混入量300 kg/m³の場合を表す。また、e, f, gは、同様にフライアッシュDを混入した場合を表す。フライアッシュ混入の有無に関わらず、長期強度における標準養生供試体の圧縮強度比は、W/Bが大きいほど大きくなっていることが認められる。通常の強度レベルでは、W/Bが大きいほど、長期強度に対する初期強度の発現率

は大きく、逆に言えば材齢28日強度に対する長期強度の増加率は小さいが、今回の実験の低W/Bでは逆の減少が見られた。これは、低W/Bになるほど、セメント硬化体の組織が緻密になり、標準養生を続けても供試体内部への水分の供給が少なくなるためと考えられる。

また、フライアッシュ混入条件では無混入条件に比べて、標準養生での強度増加の比率が大きくなる傾向にある。これはフライアッシュのポゾラン反応の効果によるものと考えられる。

一方、気中養生供試体では、材齢91日で一時的に強度の増加が見られるものの、材齢365日における圧縮強度は材齢28日と同程度または低下している。気中養生供試体は、図-2の材齢と単位容積質量との関係に示すように材齢に伴う単位容積質量の減少が認められる。材齢91日では供試体表面付近の乾燥による見かけの強度増加があるものの、材齢365日では長期の乾燥に伴う水和反応の停止と局所的な応力勾配によるマイクロクラックの発生により、材齢28日からの強度増加が見られないばかりか、強度低下を引き起こしたものもあると考えられる。

次に、フライアッシュの圧縮強度発現に対す

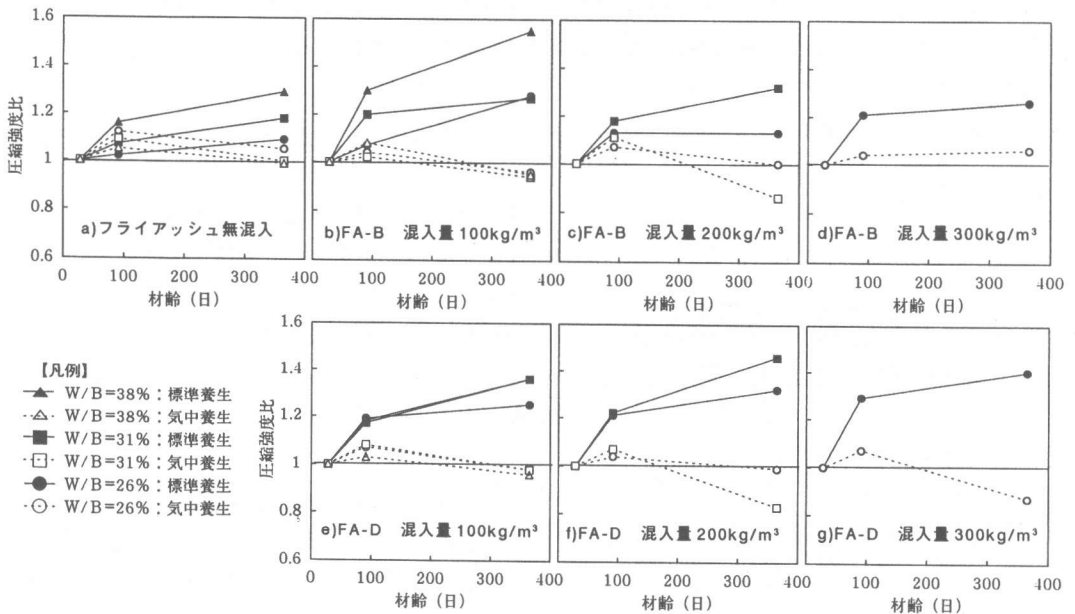


図-1 養生別の材齢28日強度基準に対する圧縮強度比

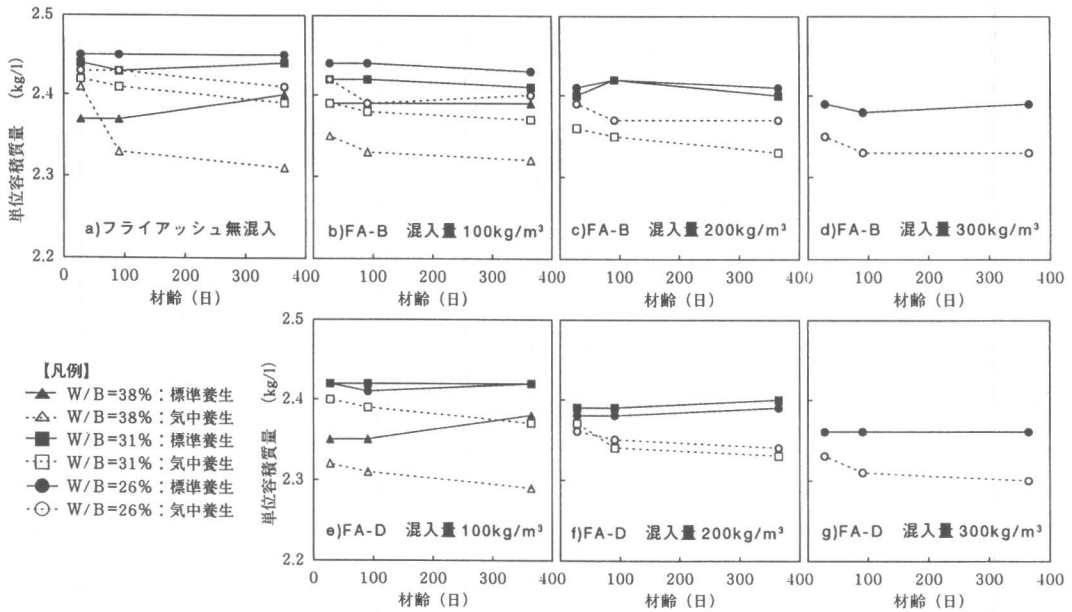


図-2 材齢と単位容積質量との関係

る寄与率を評価するために、コンクリートの圧縮強度 f_c がセメント水比の一次式で表されると仮定して、式(1)により等価セメント水比を定義し、セメントに対するフライアッシュの圧縮強度寄与率 β を重回帰分析により求めた。

$$(\text{等価 } C/W) = (C + \beta \cdot FA) / W \quad (1)$$

ここに、 W ：水量、 C ：セメント量、 FA ：フライアッシュ量である。また、重回帰式は次のように表される。

$$f_c = a \{(C + \beta \cdot FA) / W\} + c \quad (2)$$

$$= a(C/W) + a\beta(FA/W) + c \quad (3)$$

$$= a(C/W) + b(FA/W) + c \quad (4)$$

ここに、 a, b, c ：偏回帰係数である。

表-5 重回帰分析結果

		標準養生				気中養生		
		7日	28日	91日	365日	28日	91日	365日
FA-B	a	24.0	30.5	26.0	28.1	23.7	27.2	28.2
	b	8.5	17.9	20.7	20.2	14.8	16.1	17.6
	c	-15.2	-18.9	1.2	3.4	0.2	-5.1	-14.9
	β	0.354	0.587	0.796	0.719	0.624	0.592	0.624
重決定	r^2	0.98	0.97	0.93	0.87	0.94	0.94	0.96
FA-D	a	25.4	29.7	29.3	29.6	24.0	28.7	28.8
	b	9.2	14.7	22.3	24.9	14.2	16.2	13.4
	c	-19.0	-16.0	-8.1	-1.7	0.0	-8.6	-14.6
	β	0.362	0.495	0.761	0.841	0.592	0.564	0.465
重決定	r^2	0.97	0.97	0.95	0.89	0.91	0.93	0.94
平均	β	0.358	0.541	0.779	0.780	0.608	0.578	0.545

式(4)より重回帰分析を行って a, b を求め、 $\beta = b/a$ の関係よりフライアッシュの強度寄与率 β を求めた。結果を表-5に示す。

まず、養生条件の違いによる β の経時挙動は、標準養生では0.358(材齢7日平均)から0.780(材齢365日平均)と増加しているのに対し、気中養生では0.608(材齢28日平均)から0.545(材齢365日平均)と低下している。このことから、フライアッシュの強度寄与の効果をしつかりと得るには、十分な湿潤養生が必要であることがわかる。特に材齢91, 365日の標準養生は $\beta = 0.75$ 以上が得られている。次に、粉末度条件による違いは概ね養生条件に関係なく、フライアッシュBの方がフライアッシュDよりも高い β 値が得られている。このことから高粉末度条件になると内部組織が緻密化し、強度寄与に有利になることがわかる。

3.2 促進中性化

表-6に促進中性化試験結果を示す。なお、中性化速度係数は文献7)を参考に、促進期間の平方根と中性化深さとの関係から原点を通る単回帰分析を行い、得られた直線の傾きとした。

条件Iでは、フライアッシュの混入量が同じ

表-6 促進中性化試験結果

記号	促進中性化深さ mm										中性化速度係数 mm/√(week)	
	促進中性化期間：条件Ⅰ					促進中性化期間：条件Ⅱ					条件Ⅰ	条件Ⅱ
	4週	8週	13週	44週	4週	8週	13週	19週	26週			
P260	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.53	0.77	1.00	1.35	0.00	0.23	
P310	0.45	0.72	2.53	2.91	0.58	0.73	1.03	1.39	1.62	0.45	0.30	
P380	1.14	4.15	8.52	9.69	0.67	0.89	1.20	1.55	1.97	1.58	0.36	
P490	3.96	7.67	10.15	10.39	3.58	4.00	5.37	5.71	6.44	1.96	1.37	
B261	0.63	1.30	2.97	5.66	0.39	0.48	0.55	0.92	1.30	0.77	0.21	
B262	0.83	2.35	4.47	4.97	0.26	0.45	0.49	0.74	0.96	0.83	0.17	
B263	2.49	4.43	7.92	8.90	0.74	0.85	0.97	1.36	1.59	1.52	0.31	
B311	1.00	2.65	4.94	6.23	0.33	0.39	0.56	0.93	1.18	0.99	0.20	
B312	1.83	5.16	6.49	6.81	0.35	0.65	0.88	0.99	1.29	1.26	0.24	
B381	4.02	6.04	9.38	9.84	0.72	0.85	1.80	2.41	2.54	1.80	0.48	
D261	0.00	0.89	1.27	2.66	0.00	0.51	0.54	0.98	1.31	0.36	0.20	
D262	0.85	2.33	4.00	6.93	0.47	0.57	0.66	0.94	1.24	0.99	0.22	
D263	3.76	6.15	6.18	7.45	0.71	0.72	0.78	1.11	1.32	1.40	0.25	
D311	1.40	3.17	6.62	7.01	0.39	0.57	0.78	1.08	1.22	1.19	0.23	
D312	3.04	5.60	7.19	8.32	0.48	0.65	0.88	1.18	1.58	1.49	0.27	
D381	4.78	5.84	8.36	9.73	1.06	1.15	1.47	1.66	2.27	1.75	0.42	

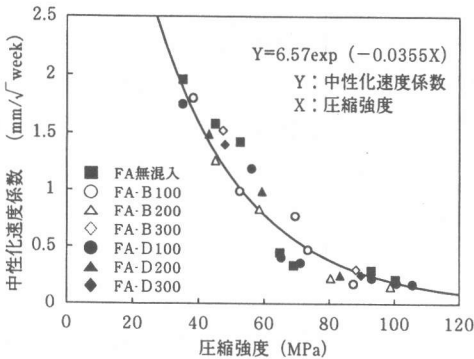


図-3 圧縮強度と中性化速度係数との関係

場合、低W/Bになるほど中性化速度は小さくなっているが、同じW/Bではフライアッシュ混入量が増加すると中性化速度は徐々に早まる傾向にある。低W/Bでは組織が緻密であるためCO₂の浸透量が抑制され、中性化が進行しにくくなるが、フライアッシュを混入すると単位セメント量の減少とポゾラン反応によるCa(OH)₂の消費のために中性化が早くなると考えられる。

一方、十分に養生した条件Ⅱでは、水和反応が十分に進み組織内が緻密になっているため、条件Ⅰに比べて中性化速度は小さい。また、フライアッシュ混入条件と無混入条件ならびにフライアッシュの粉末度の違いによる明確な差はみられなかった。

図-3 に標準養生終了時の圧縮強度と中性化

速度係数との関係を示す。条件Ⅰは標準養生期間は1週間であり、条件Ⅱは26週間であるが、材齢26週の圧縮強度試験を行っていないため、材齢13週と52週の圧縮試験結果から直線補間して求めた。この図からフライアッシュの混入量ならびに粉末度による違いはみられず、圧縮強度が増大すると中性化速度係数は減少する傾向にある。これは、コンクリートの組織が緻密化するためと考えられる。また、圧縮強度と中性化速度係数との関係は、図中に示すように指数関数⁹⁾で表すことができる。

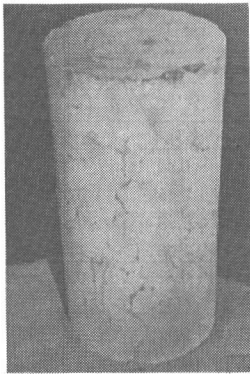
3.3 耐火性

表-7 に耐火試験における爆裂の状況を示す。なお、表-7における爆裂の評価の基準例を写真-1に示した。フライアッシュの混入の有無に関わらず、各供試体とも乾燥期間が進む

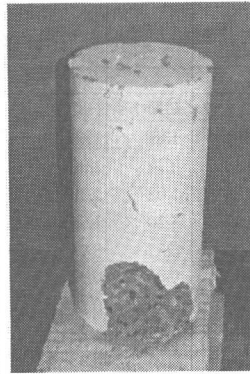
表-7 コンクリートの爆裂状況

記号	3ヶ月		6ヶ月		12ヶ月	
	状況	含水率	状況	含水率	状況	含水率
P260	×××	3.5	×	3.5	×	3.3
P310	×	3.7	×	3.6	○	3.4
B262	×××	3.2	×××	3.1	××	3.0
B312	×××	3.5	×××	3.4	×	3.2
D262	×××	3.4	×	3.3	○	3.1
D312	××	3.6	××	3.5	○	3.3

○：爆裂なし ×：小さな爆裂あり
 ××：著しい爆裂あり ×××：爆裂により大破



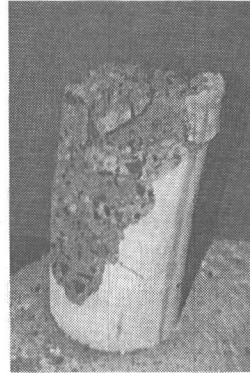
爆裂なし



小さな爆裂あり



著しい爆裂あり



爆裂により大破

写真-1 爆裂状況の基準例

につれて含水率が小さくなっている。それとともに大局的には、爆裂の程度も小さくなる傾向にある。フライアッシュの粉末度が及ぼす影響については、フライアッシュBの高粉末度条件で爆裂の程度が著しく大きくなる傾向にある。

4. 結 論

高粉末度フライアッシュを使用した高強度コンクリートの長期材齢における圧縮強度、促進中性化及び耐火性を実験的に検討した結果、本研究の範囲で以下のことが明らかとなった。

- 1) フライアッシュ混入量が増加すると、フライアッシュ無混入条件に比べ圧縮強度は低下する。しかし、長期間湿潤養生を行うとフライアッシュ混入の効果が現れ、強度増加率が向上し、強度低下が緩和される。また、高粉末度になるほど強度発現に対する寄与率が向上する。
- 2) 中性化速度係数は、低W/B条件ほど小さく

なる。同一W/B条件ではフライアッシュ混入量の増加に伴い中性化速度が早くなるが、十分に養生した条件では、フライアッシュ混入条件と無混入条件による明確な差がみられなくなる。また、圧縮強度が増大すると中性化速度係数は減少する。

- 3) 耐火性は、保存期間が進むにつれて爆裂の程度は小さくなる。また、高粉末度のフライアッシュを混入すると中粉末度のフライアッシュよりも爆裂の程度は大きい。

謝 辞

本研究は、日本フライアッシュ協会の委託により、日本建築学会に設けられたフライアッシュ調査研究小委員会の一環として行ったものである。本研究の実施で建設省建築研究所第二研究部無機材料研究室ならびに宇都宮大学建設学科建築材料研究室の皆様にご多大な御協力を賜りました。ここに記して厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 大賀宏行：フライアッシュや石炭灰を用いたコンクリート，コンクリート工学Vol.34, No.6, pp.69-74, 1996.6
- 2) 畑元浩樹，平野利光：海外炭専焼発電所から発生する石炭灰を用いたコンクリートの性状についてコンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.1, pp.413-418, 1994.6
- 3) ACI委員会報告、抄訳三井健朗：フライアッシュのコンクリートへの利用，コンクリート工学，Vol.26, No.4, pp.67-71, 1988.4
- 4) 石井光祐，浮田和明、東邦和、山本和夫：分級フライアッシュを混入した高強度コンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文報告集，13-1, pp.263-268, 1991
- 5) 丸山武彦，伊東幸夫、土田伸治、金井孝夫：シリカフェームと分級フライアッシュを用いた超高強度コンクリートの研究，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.14, No.1, pp.285-290, 1992
- 6) 大久保敏彦，中村成春、榊田佳寛、阿部道彦：分級フライアッシュを使用した高強度コンクリートの強度予測式の作成に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，19-1, pp.475-480, 1997
- 7) 大賀宏行、長瀧重義：促進試験によるコンクリートの中性化深さの予測と評価，土木学会論文集第390号/V-8, pp.225-233, 1988.2
- 8) 長瀧重義、大賀宏行、佐伯竜彦：コンクリートの中性化深さの予測，セメント技術年報 第41号, pp.343-346, 1984