論文　フライアッシュコンクリートの諸性質に及ぼすフライアッシュの種類および置換率の影響

全　洪珠[*1]・嵩　英雄[*2]

要旨：フライアッシュⅠ種,Ⅱ種,Ⅳ種を使用し，置換率 0,15,25,40%，水結合材比 43,50,55,60%におけるコンクリート実験を行った。その結果，FA コンクリートは流動性を向上させ，単位水量が低減できる。空気量 1%当たりの AE 剤必要量は，無混合< FAⅣ< FAⅡ< FAⅠの順になり，FAⅠは無混合の約 2.4 倍に達する。材齢 91 日の圧縮強度は，FAⅠが普通コンクリートとほぼ同程度であるが，FAⅡが若干低下し，FAⅣが劣る。また，FA の混入により，乾燥収縮が低減され，耐凍害性（空気量 4.5%）も普通コンクリートと同等となる。一方，中性化は FA 置換率の増加に伴い増大し, W/B で直接評価できないが､W/C と直性関係になる。

キーワード：フライアッシュ，空気量，水結合材比，乾燥収縮，中性化，凍結融解

１．はじめに

近年電力需要の急増により，フライアッシュ（以下は FA と記す）を含む石炭灰は大量に発生しており，今後も発生量も増大すると予測されている。FA の有効利用に関する研究,開発が過去から各分野で進められており，建設分野では，FA をコンクリート材料として大量かつ有効利用とする研究がなされている [1),2)]。しかし，JIS に規定された FAⅠ種および FAⅣ種についての研究が少なく，また FA 大量使用した場合の FA コンクリートについてはまだ不明な点が多い。

そこで本研究は，品質の異なる FAⅠ,FAⅡと FAⅣを普通ポルトランドセメント 15,25,40%で置換した, 水結合材比 43,50,55,60%のコンクリートと普通コンクリートについて広範囲な物性実験を行い，FA コンクリートの諸性質について実験検討を行ったものである。

２．FA の品質に関する実験（シリーズⅠ）

2.1 FA の種類と品質

提供した FA の種類と品質を**表－1** に示す。FA は JIS A 6201（コンクリート用フライアッシュ）に規定するⅠ種,Ⅱ種とⅣ種の FA 市販品のうち代表的な FA として，FAⅠと FAⅣは Y 社製，FAⅡは D 社製である。FAⅣは FAⅠを分級採取した残分である。

表－1　提供した FA の種類と品質

FA 種類	記号	SiO_2 (%)	湿分 (%)	強熱減量 (%)	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)
Ⅰ種	FAⅠ	56.9 (45.0以上)	0.22 (1.0以下)	2.3 (3.0以下)	2.40 (1.95以上)	5400 (5000以上)
Ⅱ種	FAⅡ	－ (45.0以上)	－ (1.0以下)	1.2 (5.0以下)	2.26 (1.95以上)	4260 (2500以上)
Ⅳ種	FAⅣ	55.9 (45.0以上)	0.06 (1.0以下)	1.7 (5.0以下)	2.20 (1.95以上)	1990 (1500以上)

注：( ) は JIS A 6201 の規定値

2.2 実験の目的および概要

FA はⅠ種,Ⅱ種とⅣ種を使用し，セメントに対する置換率を 0,10,25 と 40%，質量配合比は結合材 1：標準砂 3：水 0.5 とし，FA の種類と置換率がモルタルのフロー,圧縮強さと乾燥収縮に及ぼす影響を試験するとともに JIS A 6201 に規定されたフロー値比と活性度指数について検討した。実験要因と水準を**表－2** に示す。

表－2　実験要因と水準（シリーズⅠ）

要因	水準			
FA種類	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅳ種	
FA置換率(%)	0	10	25	40

*1 工学院大学大学院　工学研究科建築学専攻博士課程　工修　(正会員)
*2 工学院大学　建築学科教授　工博　(正会員)

2.3 試験方法および試験項目

フロー値比および活性度指数の試験方法はJIS A 6201 付属書 2 によって行なった。JIS には FA の置換率は 25%のみ規定されているが，本実験は FA Ⅰ種,FA Ⅱ種について，置換率 10%,40%を加えて試験を行った。

試験項目として，モルタルのフロー値比および活性度指数の以外，乾燥収縮による長さ変化率比も測定した。乾燥収縮は JIS A 1129 に準じ，4×4×16cm の供試体で材齢 7 日まで標準養生後，温度 20℃, 湿度 60%の環境下で実施した。

2.4 試験結果および考察

モルタルの試験結果を**表－3** に示す。なお，FA 無混合のモルタルのフロー値は 180.5mm，圧縮強さは 28 日で 60.5 N/㎜^{2}，91 日で 70.9 N/㎜^{2}，91 日の長さ変化率は 5.84×10^{-4} であった。

表－3　モルタルの試験結果

モルタル種類		無混合	FA種類						
			FA Ⅰ			FA Ⅱ			FAⅣ
FA置換率		0%	10%	25%	40%	10%	25%	40%	25%
フロー値比 (%)		100	105	115	120	98	101	104	98
活性度指数 (%)	28日	100	94	96	78	93	86	66	76
	91日	100	104	107	91	103	94	80	85
長さ変化率比 (%)		100	104	100	89	93	90	83	81

FA Ⅰのフロー値比が 105～120%，FA Ⅱが 98～104%，FAⅣが 98%で，FA Ⅰは比表面積の大きいに関わらず，球形粒子が多く含まれるので，流動性は最も優れ，FA Ⅱも若干改善効果があり，FAⅣは無混合と同等である。FA 種類に関係なく，FA 置換率増加に伴いフロー値比が比例して増大し，その割合は FA Ⅱより FA Ⅰの方が大きい。

FA モルタル 28 日の活性度指数は，無混合より全て小さいが，91 日の活性度指数は FA Ⅰ10 が 4%, FA Ⅰ25 が 7%, FA Ⅱ10 が 3%を上回り，FA Ⅰ40 と FA Ⅱ25 が無混合と同程度である。FA 置換率 25%の場合は，強度発現は FA Ⅰが最も優れ，FA Ⅱは無混合と同等であり，FAⅣは若干劣る。また，FA 置換率の増加に伴い圧縮強さが低下し，活性度指数が小さくなる。

乾燥収縮について，FA Ⅰより FA Ⅱと FAⅣの方は低減効果が現れる。FA Ⅰの置換率 25%までが無混合とほぼ同等であるが，40%まで増加すると乾燥収縮率が小さい。また，FA 種類に関係なく，FA 置換率の増加に伴い，乾燥収縮低減効果があり，特に置換率 40%の収縮低減が大きい。

３．FA 種類,置換率および AE 剤量がコンクリートに及ぼす影響（シリーズⅡ）

3.1 実験の目的および概要

普通ポルトランドセメントを使用した普通コンクリートに対して，FA Ⅰ種,Ⅱ種とⅣ種をセメントに対する置換率 0,15,25 と 40%，AE 剤添加量を 0A～4A に変化させた FA コンクリートを試験し, AE 剤の空気連行作用,材齢と圧縮強度の関係，圧縮強度と静弾性係数の関係および中性化速度に及ぼす FA の種類と置換率の影響について検討した。実験要因と水準を**表－4** に示す。

表－4　実験要因と水準（シリーズⅡ）

要因	水準			
FA種類	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅳ種	
FA置換率(%)	0	15	25	40
AE剤添加量 (A)	0A～4A			

3.2 使用材料およびコンクリートの調合

使用材料を**表－5** に示す。コンクリートの調合は，水結合材比 55%，空気量を 4.5%と仮定し，単位水量および単位粗骨材かさ容積 (0.62m^3/m^3) を一定にして調合を定めた。AE 減水剤は全調合について結合材（C+FA）質量に対して 0.25%を添加した。AE 剤添加量は 1A＝（C+FA）×0.02%とした。コンクリートの調合を**表－6** に示す。

表－5　使用材料（シリーズⅡ）

FA	シリーズⅠと同じものを使用した。
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度：3.16 g/cm^3, 比表面積：3320 cm^2/g
細骨材 (S)	大井川産川砂 絶乾密度：2.67 g/cm^3, 吸水率1.25%, 粗粒率：3.05
粗骨材 (G)	青梅産硬質砂岩砕石2005 絶乾密度：2.66 g/cm^3, 吸水率0.74%, 実積率：59.1%
化学混和剤	AE減水剤：リグニンスルホン酸系AE減水剤 (標準形) AE剤：非イオン界面系活性剤 (FA用AE剤)

表－6　コンクリートの調合（シリーズⅡ）

FA種類	FA置換率(%)	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m³) W	C	FA	AE剤量(A)*	フレッシュコンクリートの結果 スランプ	空気量
無混合	0	55.0	48.2	171	311	0	0.0	18.0	2.5
				171	311	0	0.5	18.0	4.2
				171	311	0	1.0	18.5	5.4
FA Ⅰ	25	73.3	47.6	171	233	78	0.0	19.0	0.4
				171	233	78	2.0	19.5	2.8
				171	233	78	3.0	19.5	4.2
				171	233	78	4.0	20.0	5.4
FA Ⅱ	15	64.7	47.7	171	264	47	0.0	17.5	1.4
				171	264	47	1.0	18.5	3.3
				171	264	47	1.5	20.0	4.4
				171	264	47	2.0	20.0	5.2
				171	264	47	3.0	20.5	7.1
	25	73.3	47.4	171	233	78	0.0	17.5	1.3
				171	233	78	1.5	19.5	2.5
				171	233	78	2.0	19.5	4.7
				171	233	78	3.0	19.0	6.0
	40	91.7	47.0	171	187	124	0.0	19.5	0.6
				171	187	124	2.5	20.0	3.7
				171	187	124	3.0	20.0	5.1
				171	187	124	3.5	20.0	5.9
FAⅣ	25	73.3	47.4	171	233	78	0.0	17.0	0.9
				171	233	78	1.5	19.0	4.5
				171	233	78	2.0	18.5	5.2

注*：1A＝(C+FA)×0.02%

3.3 練混ぜ方法および試験項目

コンクリートは，温度 20±2℃の恒温室で容量 100ℓの強制水平練りミキサを用いて作成した。練混ぜは温度 20℃に調整した材料（骨材は表乾状態）を用い，分割練混ぜ方式とし，最初粉体と細骨材を投入して 30 秒間攪拌した後，AE 減水剤と AE 剤を予め加えた練混ぜ水を投入し 60 秒間攪拌し，さらに粗骨材を投入して 90 秒間攪拌した。その後，ミキサからコンクリートを排出し，各試験を行った。

フレッシュコンクリートの試験項目は，スランプ,空気量,単位容積質量とし，硬化コンクリートの試験項目は圧縮強度，静弾性係数および促進中性化とした。

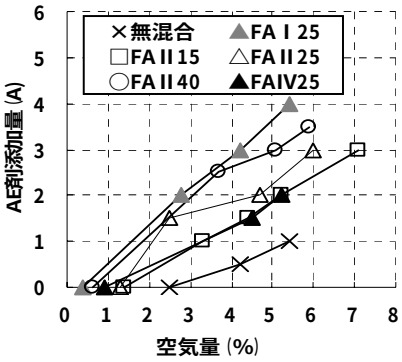
3.4 試験結果および考察

（1）AE 剤添加量

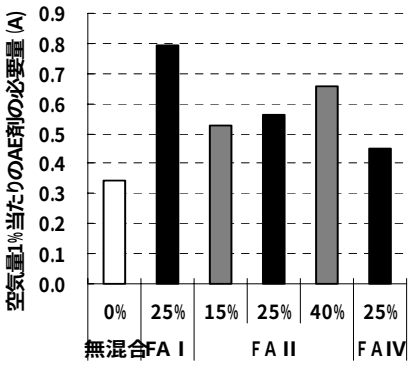
空気量と AE 剤使用量の関係を**図－1** に，空気量 1%当たりの AE 剤必要量を**図－2** に示す。FA の種類と置換率に関係なく，AE 剤添加量の増加に伴い空気量もほぼ比例して増加する。空気量 1%あたりの AE 剤必要量は，無混合< FAⅣ< FAⅡ< FA Ⅰ の順になり，FA Ⅰ が 0.8A で最も大きく，無混合の約 2.4 倍程度に達する。これは FA が AE 剤を吸着するため，特に FA の比表面積が大きく，メチレンブルー吸着量が大きいほど，単位 AE 剤量が増加すると推察される。また，FAⅡ種において，置換率の増加に伴い AE 剤添加率増加しており，FA 置換率 40%は無混合の約 2 倍程度に達する。

（2）圧縮強度

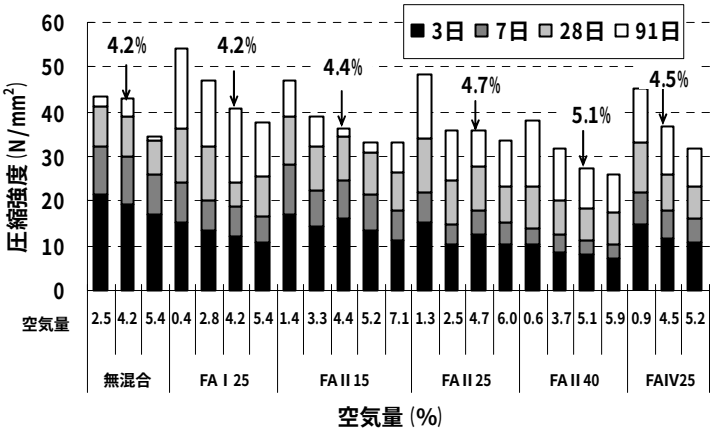
圧縮強度試験結果を**図－3** に示す。FA 種類と置換率に関係せず，空気量の増加（AE 剤量の増加による）に伴い圧縮強度が低下する。また，空気量約 4.5%のコンクリートから見ると，材齢 91 日圧縮強度は，FA Ⅰ が普通コンクリートとほぼ同程度であるが，FAⅡが若干低下し，FAⅣの低下が大きい。また，FAⅡ種において，置換率の増加に伴い圧縮強度が低下する傾向にある。FA 置換率 25%までの強度低下が見られないが，FA 置換率 40%の場合は強度低下が比較的大きい。



図－1　空気量と AE 剤添加量の関係



図－2　空気量 1%当たりの AE 剤必要量



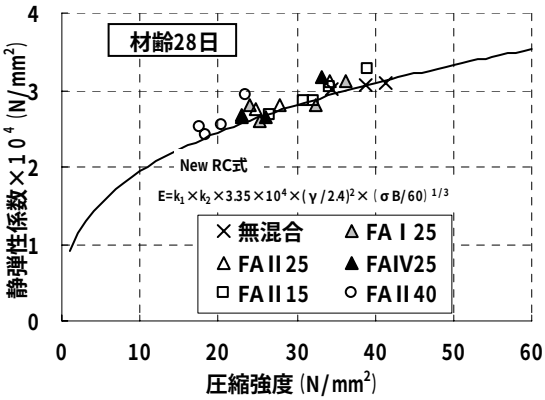
図－3　FA 種類と空気量による圧縮強度

(3) 静弾性係数

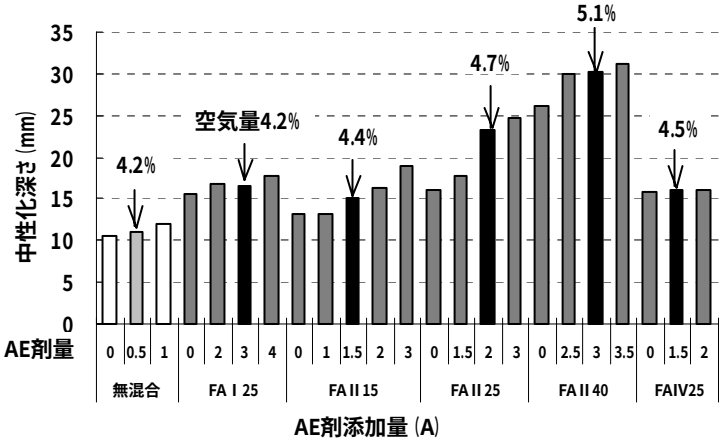
静弾性係数と圧縮強度の関係を建築学会 New RC 式と対して**図－4** に示す。FA コンクリートの静弾性係数は，同一強度の普通コンクリートより若干大きく，New RC 式による計算値に対する比率も大きい。空気量の増加に伴う静弾性係数の低下は FA コンクリートの方が大きい。

(4) 促進中性化

促進中性化の試験結果を**図－5** に示す。空気量約 4.5%の中性化深さは矢印示したように，FAⅡでは FA 置換率の増加に伴い増大し，置換率 40%では無混合の約 3 倍に達した。FA 置換率 25%の FA Ⅰ と FAⅣの中性化は同程度で，FAⅡより小さい。AE 剤量の増加すなわち空気量の増加に伴って中性化が増大し，空気量による影響は FA Ⅰ と FAⅣより FAⅡの方が大きい。



図－4　静弾性係数と圧縮強度の関係



図－5　促進中性化試験結果

4．FA 置換率,水結合材比および空気量の及ぼす影響（シリーズIII）

4.1 実験目的および概要

普通ポルトランドセメントを使用したスランプ 18cm の普通コンクリートに対して，FAⅡ種をセメントに対する置換率 0,15,25 と 40%，水結合材比（W/B）43,50 と 60%を変化させた AE コンクリートおよび Non - AE コンクリートを試験し，FA コンクリートの単位水量，材齢と圧縮強度の関係，静弾性係数および耐久性に及ぼす FA 置換率，水結合材比および空気量の影響について検討した。実験要因と水準を**表－7** に示す。

4.2 使用材料およびコンクリートの調合

使用材料はシリーズⅡと同じものを使用した。ただし，FA は FAⅡ種のみを使用した。

コンクリートの調合を**表－8** に示す。W/B を 43,50 と 60％にし，単位粗骨材かさ容積を 0.62m^3/m^3 の一定，目標スランプ 18±1.0cm，目標空気量 4.5%および 1.0%として調合を定めた。

4.3 実験方法および試験項目

コンクリートはシリーズⅡと同じ練混ぜ方法で作成した。試験項目と試験方法を表－9 に示す。

表－7　実験要因と水準（シリーズIII）

FA置換率(%)	0	15	25	40
水結合材比(%)	43	50	60	
目標空気量	1.0% (Non-AEコンクリート)		4.5% (AEコンクリート)	

表－8　コンクリートの調合（シリーズIII）

目標空気量	FA置換率(%)	W/B (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3) W	C	FA	AE剤量 (A)*	フレッシュコンクリート結果 スランプ	空気量
4.5%	0	60	60	47.5	168	280	0	0.7	17.5	4.3
		50	50	45.5	173	346	0		18.5	4.5
		43	43	43.6	176	409	0		19.0	4.5
	15	60	71	47.4	166	235	42	1.5	18.0	4.4
		50	59	45.8	167	284	50		17.5	4.8
		43	51	43.7	171	338	60		17.0	4.3
	25	60	80	47.2	165	206	69	1.9	18.5	5.3
		50	67	45.2	169	254	85		18.5	4.7
		43	57	42.9	173	302	101		18.0	4.5
	40	60	100	47.0	164	164	109	2.8	18.0	5.3
		50	83	45.2	165	198	132		18.0	4.3
		43	72	42.4	172	240	160		17.5	4.4
1.0%	15	60	71	48.1	179	254	45	0.0	17.5	1.3
		50	59	45.7	179	304	54		17.0	1.3
		43	51	44.4	183	362	64		17.5	1.3
	25	60	80	48.2	179	224	75	0.0	17.5	0.9
		50	67	46.4	181	272	91		18.0	0.8
		43	57	44.2	184	321	107		17.5	1.3
	40	50	83	46.2	180	216	144	0.0	18.5	0.8
		43	72	44.0	183	255	170		19.0	0.7

注*：1A=(C+FA)×0.02%

表－9　試験項目および試験方法

圧縮強度 静弾性係数 動弾性係数 引張強度 曲げ強度	各関連JISおよびJIS原案に準じ，標準養生後，圧縮強度は材齢7、28、42、91日に測定，引張、曲げ強度は材齢28日に測定
乾燥収縮 (10×10×40)	JIS A 1129に準じ，材齢7日標準養生後，温度20℃、湿度60%の環境下で材齢91日まで実施
促進中性化 (10×10×50)	水中28日，気中養生28日後，温度20℃、湿度60%、CO_2濃度5%の環境下で材齢91日まで実施
凍結融解 (10×10×50)	JIS A 1148に準じ，材齢28日まで標準養生後，-18℃～5℃で凍結および融解の繰り返しの環境下で300サイクルまで実施

4.4 試験結果および考察

(1) 単位水量

FA 置換率による計画調合の単位水量の比較を**図－6** に示す。AE コンクリートでは，FA コンクリートは無混合より，単位水量が 3～5kg 程度低減したが，FA 置換率の増加に伴い単位水量の変動は小さく，FA 置換率による影響は認められず，シリーズ I のフロー値比の傾向とは対応しなかった。FA 混入の Non-AE コンクリートは AE-コンクリートより単位水量が 5～8%程度増加し，建築学会のコンクリート調合設計指針の参考調合表の 8.5%より少ない。

(2) 圧縮強度

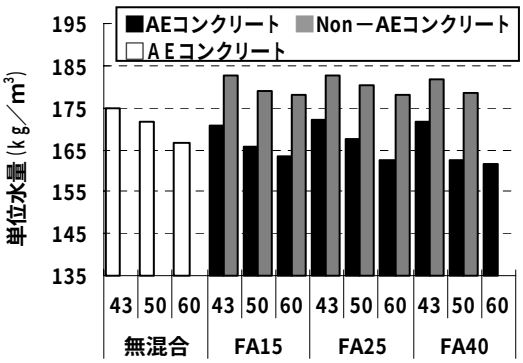
圧縮強度試験結果を**図－7** に示す。同一の W/B および空気量において，FA 置換率の増加に伴い圧縮強度が低下し，W/B の高いほど圧縮強度差が大きくなる。空気量による影響は大きく，Non−AE コンクリートの AE に対する圧縮強度の増加は平均 20%程度高くなった。

(3) 乾燥収縮

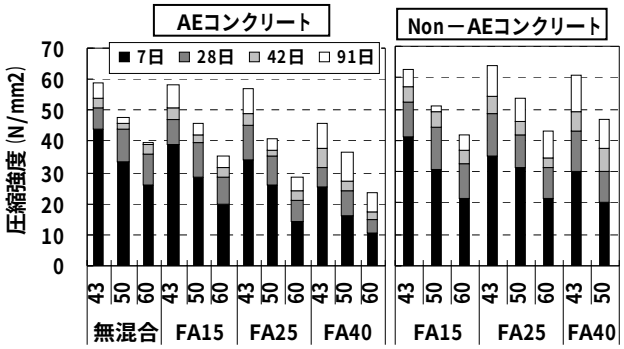
乾燥収縮の試験結果を**図－8** に示す。FA コンクリートは普通コンクリートより乾燥収縮は小さく，FA 置換率および水結合材比の増大に伴って減少し，減少の割合は単位水量の低減割合より大きかった。また，Non-AE コンクリートは AE に比較して単位水量の増加に係わらず，乾燥収縮は 3～10%程度減少した。

(4) 凍結融解抵抗性

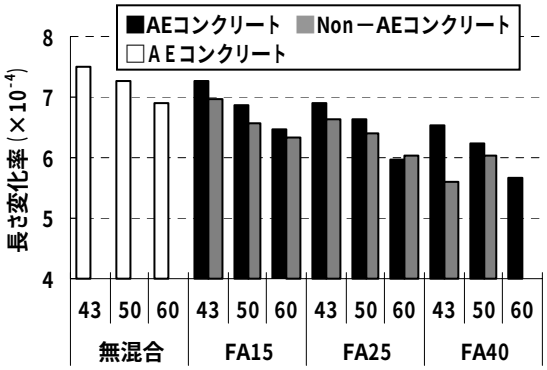
凍結融解抵抗性の試験結果を**図－9** に示す。



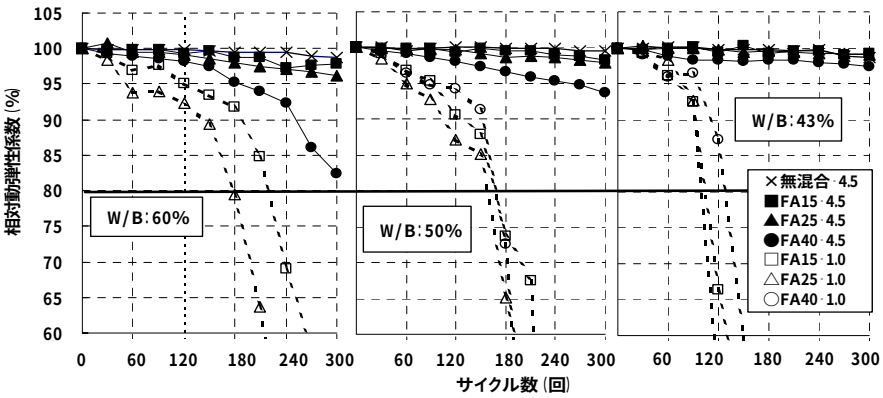
図－6　FA 置換率による単位水量



図－7　FA 置換率と W/B による圧縮強度



図－8　長さ変化率（91 日）

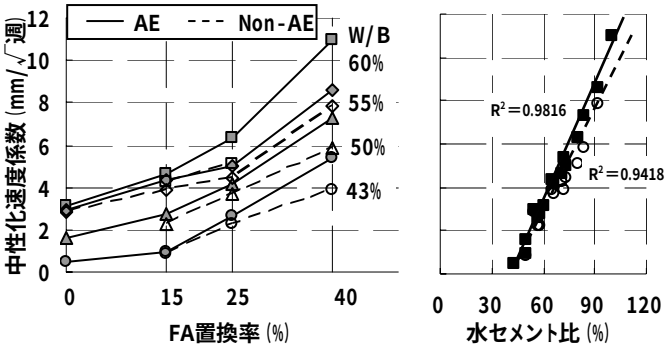


図－9　相対動弾性係数の変化

300 サイクル終了時の相対動性係数値から，AE 剤の使用量調整により，所定の空気量（4.5%）を連行することによって耐凍害性を向上する。Non-AE コンクリートは全て耐凍害性が劣る。低い W/B の 43%では FA 置換率による影響が認められないが，高い W/B の 60%では FA 置換率が大きいほど耐凍害性低下の傾向が現れる。

（5）中性化

促進中性化試験結果を**図－10** に示す。a 図に示すように，中性化速度は FA 置換率の増加に伴って増大し，置換率 40%では無混合の約 3 倍程度に達する。また，AE コンクリートは Non-AE に対して 1.2%程度中性化速度が大きい。W/C と中性化速度の関係は b 図の通りであり，FA 置換率および W/B に係わらず，中性化速度は W/C と直線関係になり，相関性が大きい。また，空気の連行の有無により中性化速度と W/C の関係は 2 本の直線になる。



a. FA 置換率・W/B と中性化速度　b. W/C と中性化速度

図－10　FA 置換率・W/B と中性化速度の関係

（6）FA の混合・無混合に関わらず，所定の空気量（4.5%）を連行することによってコンクリートの耐凍害性が向上する。W/B60%では FA 置換率が大きいほど耐凍害性低下の傾向が現れる。

（7）中性化は FA 置換率の増加に伴って増大し，置換率 40%では無混合の約 3 倍に達する。AE コンクリートより Non-AE の中性化が少なく，W/B の高い,置換率の大きいほど中性化の差が大きい。

５．まとめ

本実験の範囲内で以下のことが明らかとなった。

（1）FA コンクリートは，普通コンクリートより単位水量が 3～5kg 低減した。FAⅡ種の場合，FA 置換率が増やしても単位水量は減少しない。

（2）空気量 1%当たりの AE 剤の必要量は，FA 置換率の 25%の場合は，無混合< FAⅣ< FAⅡ< FAⅠの順に大きくなり，FA 置換率が大きいほど AE 剤の必要量が大きい。

（3）FAⅠの圧縮強度が普通コンクリートとほぼ同程度であるが，FAⅡと FAⅣは若干低下している。また，Non−AE の圧縮強度は AE より約 20%高く，FA 置換率の大きいほど，圧縮強度差はさらに大きくなる。

（4）FA コンクリートの静弾性係数は，同一強度の普通コンクリートより若干大きい。

（5）普通コンクリートと比べ，FA コンクリートは乾燥収縮が小さい。乾燥収縮率は，FA 置換率および水結合材比の増大に伴い小さくなる。

なお，本研究は文部科学省学術フロンティア整備事業による，工学院大学 EEC 研究の一環および電力共通研究による日本建築学会受託研究「フライアッシュを使用するコンクリートの建築物への適用に関する研究」の一環として実施した研究の一部をとりまとめたものである。

本論文は 2003 年建築学会大会論文を整理し，加筆したものである [3)]。

参考文献

1) 船本憲治ら：フライアッシュを 45%まで内割使用したコンクリートに関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.73‐78，1990

2) 黄光律ら：フライアッシュを大量使用したコンクリートの微細組織と圧縮強度，日本建築学会構造系論文集，No.517，pp.11‐16，1999.3

3) 全洪珠，洪杰，渡辺秀樹，嵩英雄：コンクリートに及ぼすフライアッシュの種類と置換率の影響に関する実験的研究（その 1，その 2）日本建築学会学術講演集（東海），pp455‐458，2003.9