

# 報告 フライアッシュを使用したコンクリートの屋外暴露試験

安田 正雪<sup>\*1</sup>・阿部 道彦<sup>\*2</sup>・千歩 修<sup>\*3</sup>・小山 智幸<sup>\*4</sup>

**要旨:** 品質の異なる3種類のフライアッシュを普通ポルトランドセメントの15, 30, 45%代替として用いた水結合材比27, 40, 55%のコンクリート供試体を材齢4週まで標準養生を施した後、つくば、北海道および九州地域にそれぞれ屋外暴露し、材齢1年および3年における強度試験や中性化試験などを行った。その結果、①屋外暴露したフライアッシュを使用したコンクリート圧縮強度の地域差はほとんど認められず、いずれもフライアッシュの置換率が大きく、水結合材比が大きいものほど強度の増進が認められたが、Ⅲ種のフライアッシュを使用したコンクリートの強度増進はやや小さい。②屋外暴露の中性化速度は、水セメント比と強い相関がある。  
**キーワード:** フライアッシュ, 屋外暴露, 圧縮強度, 中性化, 水セメント比

## 1. はじめに

フライアッシュの発生量は今後増大することが予想されているほか、海外炭の使用などによりその品質が多様化し、フライアッシュを有効利用する観点からコンクリートについて更なる需要の拡大が望まれ、フライアッシュを使用したコンクリートについて多くの実験研究が行われた。それらの成果をもとに、コンクリート用フライアッシュのJIS規格が改正され、コンクリートに使用できるフライアッシュの種類が多くなり、またその使用方法が建築学会および土木学会の指針に明記された。しかし、多様化したフライアッシュや置換率を多くした場合のコンクリートの長期強度および中性化性状についてはまだ不明な点が多い<sup>1) 2)</sup>。

本報告は、品質の異なる3種類のフライアッシュを普通ポルトランドセメントの15, 30, 45%代替として用いた水結合材比27, 40, 55%のコンクリート供試体について、材齢4週まで標準養生を施した後、引続き標準養生を継続したもの、屋内に保存したもの、つくば、北海道および九州地域にそれぞれ屋外暴露したものについて、

材齢1年および3年において強度試験や中性化試験を行い、フライアッシュを使用したコンクリートの長期性状についてとりまとめたものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験計画

表-1に実験に用いたコンクリートの組合わせを示す。コンクリートの水結合材比は27, 40, 55%の3水準とし、普通ポルトランドセメントの30%を品質の異なる表-2に示す3種類のフライアッシュで置換したほか、一部15%, 45%を置換した場合のコンクリートについて試験を行った。また、比較のために通常のコンクリートについても試験を行った。さらに、水結合材比55%, フラ

表-1 コンクリートの組合わせ

フライアッシュ記号	なし	H		M		L	
置換率(%)		30	45	15	30	45	30
W/B=78.7% (SL=18cm)	○	-	-	-	-	-	-
W/B=55% (SL=18cm)	○	-	-	-	○	-	○
W/B=40% (SL=18cm)	○	○	○	○	○	○	○
W/B=27% (SL=25cm)	○	○	-	-	○	-	-

\*1 東洋建設(株)美浦研究所材料研究室主任研究員 (正会員)

\*2 建設省建築研究所第2研究部無機材料研究室長 工博 (正会員)

\*3 北海道大学工学部建築学科 助教授 工博 (正会員)

\*4 九州大学大学院人間環境学研究科 講師 工博 (正会員)

イアッシュ置換率30%の場合のコンクリートの水セメント比にあわせ、水セメント比78.7%の通常のコンクリートについても試験を行った。

## 2.2 使用材料

セメント(C)：普通ポルトランドセメント 3 銘柄  
等量混合、密度 $3.16\text{g/cm}^3$ 、比表面積 $3320\text{cm}^2/\text{g}$   
フライアッシュ(FA)：表-2の物性、3 銘柄  
水(W)：上水道水

細骨材(S)：大井川産陸砂、表乾密度 $2.59\text{g/cm}^3$ 、

吸水率1.74%、粗粒率2.86

粗骨材(G)：岩瀬産硬質砂岩砕石2005、

表乾密度 $2.63\text{g/cm}^3$ 、吸水率0.80%、粗粒率6.64、  
実積率59.5%

混和剤：リグニンスルホン酸系AE減水剤(Ad1)、

ポリカルボン酸系高性能AE減水剤(Ad2)、  
フライアッシュ用AE剤 (FA用AE剤)

## 2.3 コンクリートの調合

表-3にコンクリートの調合を示す。コンクリートの目標スランプおよび空気量は、水結合材比40%と55%がそれぞれ $18\pm 1.5\text{cm}$ 、 $4.5\pm 1.0\%$ 、水結合材比27%がそれぞれ $25\pm 1.5\text{cm}$ 、 $3.0\pm 1.0\%$ とした。単位水量は $185\text{kg/m}^3$ を最大とし、No.1~No.9とNo.14の調合ではAE減水剤を、No.10~No.13の調合では高性能AE減水剤を使用した。

## 2.4 試験体の作製方法と試験方法

コンクリートの練混ぜは100ℓパン型強制ミキ

表-2 フライアッシュの物性

項目	種類	I種	II種	III種
	記号	H	M	L
二酸化けい素 (%)		69.2	55.8	61.5
湿分 (%)		0.1	0.0	0.3
強熱減量 (%)		2.3	0.9	8.0
密度 ( $\text{g/cm}^3$ )		2.35	2.27	2.07
比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) (ブレーン方法)		6510	3890	3410
フロー値比 (%)		110	110	90
活性度 指数 (%)	材齢28日	98	90	80
	材齢91日	103	103	92

サを用いて行い、1回の練混ぜ量を65ℓとした。

練混ぜ方法は、W/B=55%、40%では一括練混ぜ方式とし、結合材と細骨材をミキサに投入し10秒間混合した後、粗骨材、水および混和剤を投入し90秒間練り混ぜ後、容器に排出した。W/B=27%では分割練混ぜ方式とし、結合材、細骨材、水および混和剤を投入し120秒間練り混ぜて予めモルタルを製造し、さらに粗骨材を投入して90秒間練り混ぜ後、容器に排出した。これをそれぞれ2回繰り返して、混合したものをコンクリート試料とした。供試体の作製は、試験室(温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$ )で軽量鋼製型枠を用いて行った(平成8年10月29日、30日)。供試体の寸法と形状は直径10cm、高さ20cmの円柱形であり、各調合毎に66体作製した。型枠の脱型は材齢2日とし、材齢4週まで標準養生を施し、1週間屋内(温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$ )で保存した後、各暴露地へ発送し、材齢6週から暴露を開始した。暴露地は、①つくば地域(東洋建設(株)美浦研究所)②北海道地域(北海道大学)③九州地域(九州大学)の3ヶ所とした。供試体は各3本

表-3 コンクリートの調合とフレッシュコンクリートの性質

調合 No.	W/B (%)	W/C (%)	FA		s/a (%)	単位量( $\text{kg/m}^3$ )						フレッシュコンクリートの性質					
			記号	置換率 (%)		B			S	G	Ad1 (Cx%)	Ad2 (Cx%)	FA用AE剤 (Cx%)	スランプ (cm)	スランプフロー (mm)	飽量 (%)	温度 ( $^\circ\text{C}$ )
						W	C	FA									
1	55	55	—	—	45.3	178	324	—	790	970	0.25	—	0.007	19.0	—	4.5	19.5
2			M	30	46.3	163	207	89	824	970	0.25	—	0.02	17.0	—	4.2	19.5
3			L	30	43.1	185	235	101	723	970	0.25	—	0.006	16.5	—	5.2	19.5
4	40	40	—	—	40.8	185	463	—	658	970	0.25	—	0.01	17.0	—	5.0	20.0
5			H	30	41.2	175	306	131	668	970	0.25	—	0.05	19.5	—	4.5	21.0
6				45	41.8	168	231	189	686	970	0.25	—	0.07	19.0	—	4.7	20.5
7			M	15	40.4	183	389	69	648	970	0.25	—	0.02	19.5	—	4.8	20.0
8				30	40.1	180	315	135	640	970	0.25	—	0.03	18.0	—	4.8	20.0
9				45	40.2	175	241	197	642	970	0.25	—	0.06	17.5	—	5.5	20.0
10				L	30	38.6	185	324	139	601	970	—	1.0	0.07	17.0	—	5.4
11	27	38.6	—	—	47.1	162	600	—	754	860	—	2.0	0.001	25.0	550x540	2.6	21.5
12			H	30	45.3	162	420	180	702	860	—	1.0	0.0015	24.5	480x475	2.9	21.0
13			M	30	45.1	162	420	180	697	860	—	1.45	0.001	24.0	495x490	2.3	21.5
14			L	30	47.7	178	226	—	870	970	0.25	—	0.0015	18.5	—	5.3	19.5

1組とし、各地域に暴露した供試体の本数は合計168本（3本×14種類×4材齢）である。屋外暴露と屋内保存の試験材齢は1年、3年、10年および20年である。標準養生の試験材齢は4週、13週、1年、3年、10年、20年である。表-4に試験手順を示す。試験項目は、外観観察、圧縮強度、ヤング係数、中性化深さなどである。なお、暴露方法は、つくばと北海道地域ではブロック上に型枠塗装合板を載せ、さらにプラスチック製のレールを敷き、その上に打込み面を下側に向けて暴露した。九州地域ではステンレス製のアングル上に暴露した。なお、外周部の供試体は劣化を受けやすいため、外周部にダミーの供試体を置いた他、供試体の位置はコンクリートの調合と番号に応じてそれぞれ定めた。

### 3. 実験結果

#### 3.1 圧縮強度、ヤング係数

圧縮強度試験結果を表-5に示す。図-1および図-2に、標準養生した材齢4週圧縮強度に対する標準養生と屋内保存の材齢1年と材齢3年の強度比をそれぞれ示す。標準養生した供試体の材齢28日からの材齢1年まで強度増進は大きく、またフライアッシュの置換率が大きい調合ほど大きく、また水結合材比が大きい調合ほど大きいといえる。一方、屋内に保存したものでも、強度増進はフライアッシュの置換率が大きいほど大きい傾向があるが、強度増進は標準養生のものとは比べて小さいといえる。強度が増進

表-4 試験手順

- 1)試験材齢の約1週前に暴露地からつくばへ発送する。
- 2)外観を目視観察し、ひび割れやスケリング等の劣化の有無を写真などで記録する。その後、端面を処理して、試験前までの2日間、20±1℃の水中に保存する（屋内保存を除く）。
- 3)圧縮強度試験直前に、質量と寸法（直径-中央部2箇所、高さ-2箇所）の測定、ならびにJIS A 1127に従って縦振動の測定を行う。
- 4)圧縮強度試験は、最大荷重3000kNの圧縮試験機で行なう。試験と同時に、コンプレッソメータを用いて応力とひずみを測定し、ヤング係数を算定する。
- 5)中性化深さは、圧縮強度試験を終了した供試体を割裂し、供試体の各側面を5箇所測定し平均する。ただし、爆裂した供試体は破壊面で測定した。

しない理由としては、長期の乾燥ともなう水と反応の停止などが考えられる。

図-3に、標準養生した材齢4週圧縮強度に対する各地に暴露した材齢3年の強度比を示す。3地区の暴露した結果を比較すると、強度比はつくば地域のものがやや小さく、北海道地域のものの方がやや大きい傾向がある。しかし、それぞれの地域における同一水結合材比のフライアッシュを使用しないコンクリートに対する強度比で示すと図-4に示すようであり、つくば地域のフライアッシュを使用したコンクリートの強度比は他の地域よりもやや大きい傾向にあるといえる。今後の強度変化の推移をみる必要があるが、現在のところ、フライアッシュを使用しないコンクリート強度の地域差がないとすると、図-3に示した地域による差はばらつきの範囲内であると思われる。

表-5 圧縮強度試験結果

(単位：N/mm<sup>2</sup>)

調合NO.	W/B (%)	F A		標準養生				屋内 (20℃,60%)		屋外暴露						
		記号	置換率 (%)	材齢 4週	材齢 13週	材齢 1年	材齢 3年	材齢 1年	材齢 3年	つくば		北海道		九州		
										材齢 1年	材齢 3年	材齢 1年	材齢 3年	材齢 1年	材齢 3年	
1	55	-	-	39.8	47.3	50.1	48.5	35.1	42.1	46.4	48.2	44.9	49.8	45.9	49.1	
2		M	30	27.4	34.1	47.8	56.4	63.4	39.1	44.5	53.6	53.7	48.7	55.2	53.6	57.1
3		L	30	24.4	34.2	41.2	44.4	25.7	32.8	37.2	38.0	36.0	38.3	36.2	39.2	
4	40	-	-	52.2	62.9	66.5	69.7	48.9	56.1	64.8	63.6	63.8	68.8	64.3	67.5	
5		H	30	43.8	60.4	68.3	73.6	48.9	56.7	66.0	61.7	61.6	68.4	63.7	68.1	
6			45	34.1	47.8	56.4	63.4	39.1	44.5	53.6	53.7	48.7	55.2	53.6	57.1	
7		M	15	48.0	61.3	69.2	66.6	49.2	56.8	65.3	66.3	62.1	67.7	64.7	67.8	
8			30	41.0	57.2	66.8	67.7	43.9	50.3	62.3	62.8	58.7	62.3	61.0	63.9	
9			45	28.6	41.1	51.8	58.1	32.9	39.8	46.4	47.9	42.9	48.9	47.2	50.7	
10		L	30	37.7	50.0	55.4	55.7	38.1	44.0	51.4	49.5	47.7	51.9	50.0	51.6	
11	-	-	95.4	106	117	123.6	105	115.1	114	118.4	114	125.5	116	120.9		
12	27	H	30	83.0	92.2	104	120.6	92.0	103.9	112	113.2	109	118.5	112	116.7	
13		M	30	82.6	101	120	123.9	91.4	106.9	111	109.7	109	120.5	108	123.5	
14	78.7	-	-	19.5	23.8	24.4	25.7	17.1	23.6	24.2	25.2	22.3	26.0	23.4	26.2	

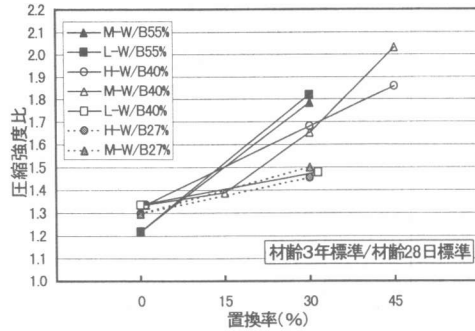
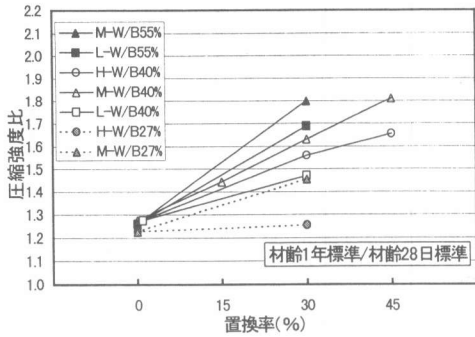


図-1 材齢4週強度に対する強度比 (標準)

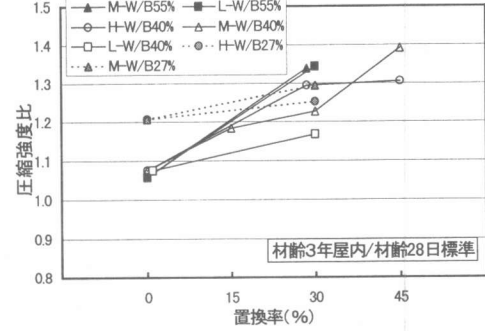
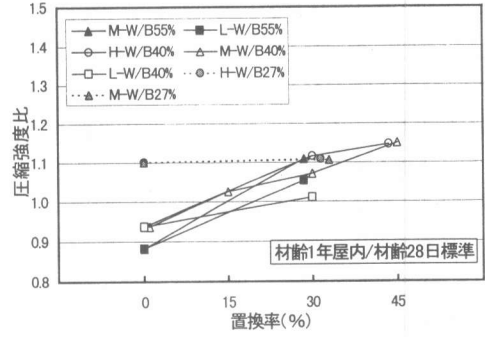


図-2 材齢4週強度に対する強度比 (屋内)

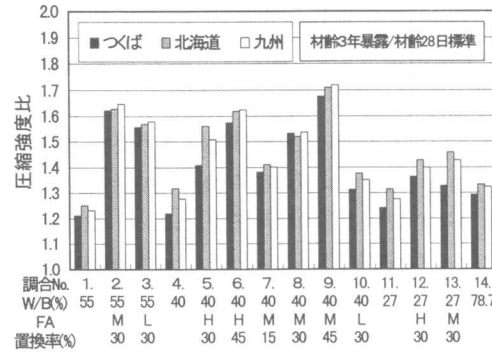


図-3 材齢4週強度に対する強度比 (暴露)

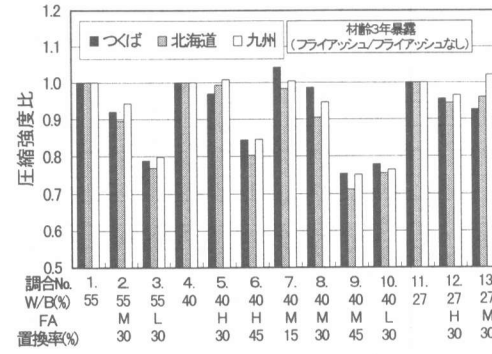
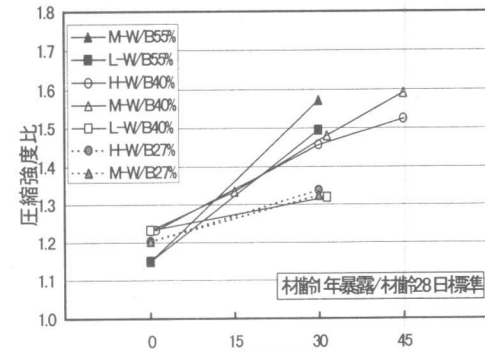


図-4 暴露各地の同一水結合材比のフライアッシュなしに対する強度比 (暴露3年)

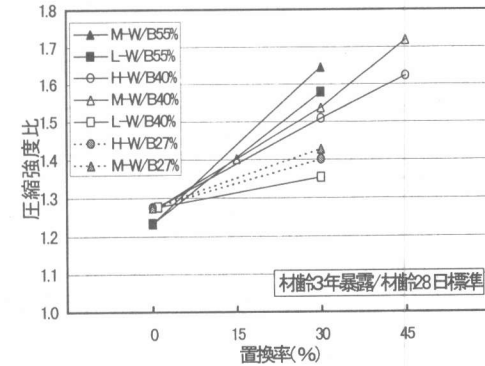


図-5 材齢4週強度に対する強度比 (暴露)

図-5に標準養生した材齢4週圧縮強度に対する暴露3地域の平均値の材齢1年と材齢3年の強度比を示す。標準養生したものと同様に、いずれのフライアッシュを使用したコンクリート圧縮強度も材齢28日からの材齢1年まで強度増進は大きい、材齢1年から材齢3年までの強度増進は少ない。強度増進はフライアッシュの置換率が大きい割合ほど大きく、また水結合材比が大きいほど大きいといえる。フライアッシュの種類別でみると、Ⅲ種のフライアッシュを使用したコンクリートの強度増進はやや小さい傾向にある。なお、環境条件別の強度増進の影響を、材齢3年におけるフライアッシュ置換率30%の強度比でみると、屋外暴露が約35~65%であるのに対して、標準養生が約45~80%、屋内保存が約15~35%であり、屋外暴露した供試体の強度増進は標準養生と屋内保存のほぼ中間にあるといえる。

次に、各養生別のフライアッシュの種類や置換率の影響を調べるため、同一水結合材比のフライアッシュを使用しないコンクリートに対する強度比について図-6に示す。暴露したものは3地域の平均値で示した。いずれのフライアッシュを使用したコンクリートも、フライアッシュを使用しないコンクリートに対して標準養生の材齢4週における強度比は置換率が大きいほど小さいが、材齢3年ではいずれの条件でもその差は少なくなり、長期にわたるポゾラン反応があるものと考えられる。しかし、強熱減量が多いL(Ⅲ種)のフライアッシュを用いた場合、H(Ⅰ種)やM(Ⅱ種)のフライアッシュを用いた場合と比較して強度比が小さいといえる。

図-7に、材齢3年におけるW/B=40%のコンクリートのヤング係数を示す。屋外暴露した供試体のヤング係数は暴露地域による差が認められず、その値は標準養生と屋内保存の中間にある。

なお、屋外暴露期間1年では、各地域に暴露した供試体に微細なひび割れやスケーリングなどの劣化は認められなかったが、屋外暴露期間3年では、フライアッシュの置換率が多いも

のに微細なひび割れが認められ、特につくば地域に暴露したものがやや多かった。

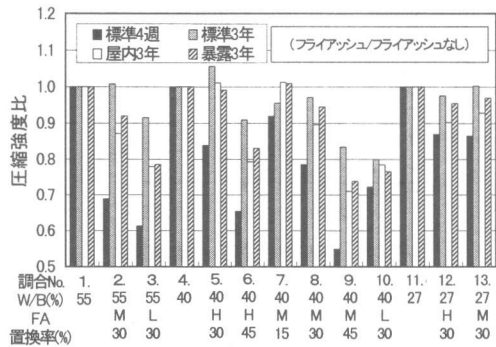


図-6 同一水結合材比に対する強度比

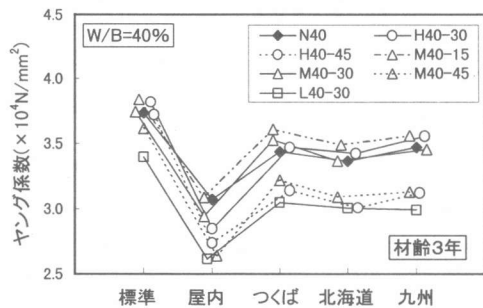


図-7 ヤング係数

### 3.2 中性化

図-8に地域別の中性化深さを、図-9に材齢別の中性化深さをそれぞれ示す。屋内の炭酸ガス濃度は0.05%程度である。屋外暴露した供試体の中性化深さは地域による大差がなく、屋内のものより小さい。中性化は、水結合材比が40%以上の割合で材齢とともに進行し、中性化深さは水結合材比が大きく、フライアッシュの置換率が大きいものほど大きいといえる。なお、フライアッシュの種類や微細なひび割れが中性化に及ぼす影響は現時点では明瞭でない。

図-10に中性化速度と各値の関係を示す。経過年数が少ないが、屋外暴露の中性化速度は、材齢4週圧縮強度の平方根の逆数よりも水セメント比との相関が強いといえる。また、屋外暴露と屋内の中性化速度をそれぞれ材齢3年圧縮強度の平方根の逆数で一義的にあらわす

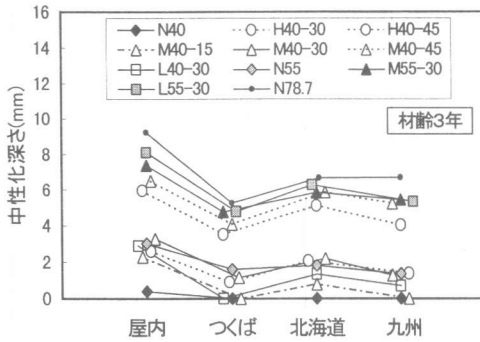


図-8 中性化深さ (地域別)

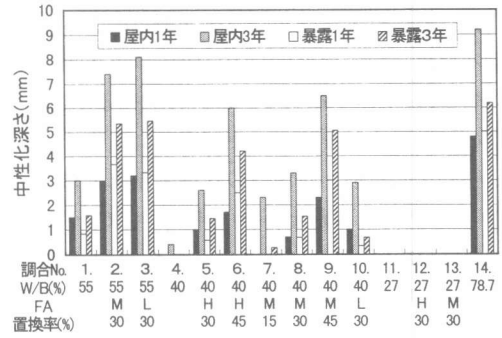


図-9 中性化深さ (材齢1年, 材齢3年)

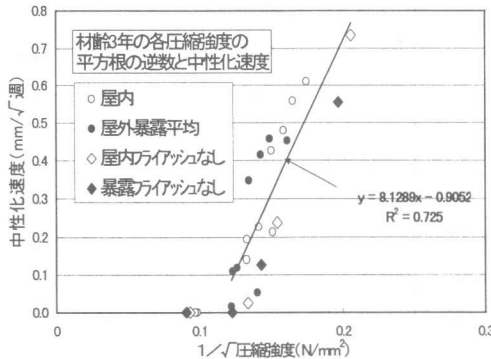
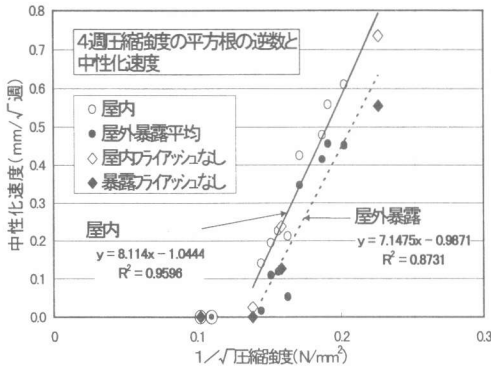
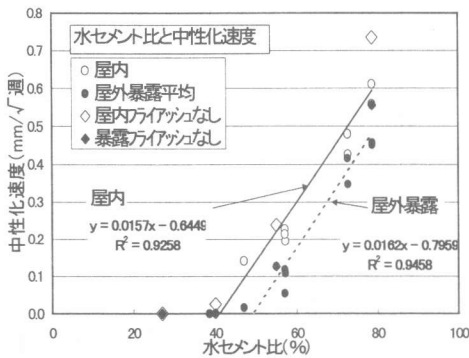


図-10 中性化速度と各値との関係

と、両者には強い相関は認められない。なお、圧縮強度が低くなるとフライアッシュを使用したコンクリートの方が中性化は速くなる傾向にある。

#### 4. まとめ

フライアッシュを使用したコンクリートの3年までの試験結果は以下のとおりである。

- (1) 屋外暴露したフライアッシュを使用したコンクリートの圧縮強度に地域差は、現在のところほとんど認められない。
- (2) 強度増進はフライアッシュの置換率が大きく、水結合材比が大きいものほど大きいですが、Ⅲ種のフライアッシュを使用したものはやや小さい。
- (3) 屋外暴露した供試体の中性化速度は、水セメント比と強い相関がある。

(謝辞) 本実験の実施にあたり、(財) 建材試験センターの飛坂氏、鈴木氏、東洋建設(株)の荒金氏の御協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会コンクリートライブラリー第64号、フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と発錆に関する長期研究、1988.3
- 2) 和田真平, 阿部道彦, 柳 啓, 藤田 克巳: フライアッシュの中性化, 水密性および遮塩性に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.20, No.2, 1998, pp.121~126