

論文 フライアッシュを使用したコンクリートの長期強度発現に及ぼす湿潤養生の影響

呉 富栄^{*1}・榎田 佳寛^{*2}・中村 成春^{*3}

要旨：フライアッシュ混入コンクリートについて，養生を種々の湿潤条件に変化させ，中・長期の強度発現性状を検討した結果，(1) 水中・封緘・気中一定の各基準養生下の圧縮強度は，フライアッシュ混入の影響を受けたが，材齢ごとの基準養生下の強度に対する種々の養生条件下の強度比変化は，フライアッシュの混入にあまり影響せず，元々の W/C に依存していたこと，(2)若材齢にて湿潤養生が不足した場合，フライアッシュが結合材として強度発現に寄与する比率は，若材齢時の約 40%のまま，あまり変化せず，長期材齢に至っていること。それら等が明らかになった。

キーワード：フライアッシュ，長期強度，湿潤養生，強度発現，若材齢，単位容積質量

1. はじめに

近年，電力エネルギー供給源の分散・多様化の要求から，石炭火力発電が見直され，今後石炭灰の発生量の増加が予想される。この石炭灰の有効利用の一つに，フライアッシュをコンクリート用混和材として利用することが考えられる。しかし，フライアッシュは，土木分野ではよく利用されているものの，建築分野では電力施設の RC 工事以外への利用は非常に少ない。一般に，フライアッシュを使用したコンクリートは，初期強度発現が小さくなると言われており，十分な湿潤養生が必要であり，現行の建築工事の工程では，利用しにくいと考えられている。しかしながら，近年の循環型社会環境の推進から，建築分野においても，建築工事へのフライアッシュ需要を増やす必要があり，フライアッシュ混入コンクリートの種々の物性を精緻に把握し，建築工事への適用条件を明らかにする必要がある。

フライアッシュ混入コンクリートに関する既往の研究は，古くから数多くあるが，主として，フライアッシュの大量利用を見込み，セメントや細骨材との適切な代替条件を探るフライアッシュ混入率に着目した研究¹⁾，フライアッシュ

が及ぼす低発熱性に着目した研究²⁾，フライアッシュが及ぼす中性化特性に着目した研究¹⁾，等に大別される。しかし，これらの研究の知見からは，建築用 RC 構造物の供用に着目した場合，初期養生環境が及ぼす中・長期の強度発現性状の影響について，十分な解明はなされておらず，不明な点が多い。

本研究は，フライアッシュを混入したコンクリートについて，初期養生期間の湿潤状態を種々の条件に変化させ，中・長期の強度発現性状に及ぼす影響を実験的に検討したものである。

2. 実験概要

表 - 1 に実験の要因と水準を示す。フライアッシュ混入コンクリート (F3) は，水セメント比 (W/C) が 40%，水結合材比 (W/B) が 30% の調合とした。ここで，F3 におけるフライアッシュが及ぼす強度発現効果は，フライアッシュ無混入で，W/C を F3 と同一条件の 40% としたプレーンコンクリート (P4) と，F3 の W/B を同一とした W/C が 30% のプレーンコンクリート (P3) により比較した。

養生条件については，全材齢を通して，20 水中養生 (W)，20 封緘養生 (S)，20 60%RH

*1 宇都宮大学大学院工学研究科 博士後期課程 工修 (正会員)

*2 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学助手 工学部建設学科 工博 (正会員)

気中養生 (A) の 3 種類の一定養生を基準養生として設定し、各々の基準養生から、材齢 7 日及び 28 日に、W, S, A の 3 養生条件に切替える設定をした。ここで、本実験の養生条件は、養生切替前の養生種類 + 養生を切替えた材齢 (基準養生は、養生切替材齢を 00 とする) + 養生切替後の養生種類の記号で表し、全部で 15 養生条件を設定した。

圧縮強度の測定材齢は、7, 28, 91, 182, 273 日の 5 材齢とし、初期養生中の若材齢強度から養生切替後の中・長期強度までをカバーした。

表 - 2 に実験に使用した材料の種類及び品質を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを、フライアッシュは JIS A 6201 の種品で、活性度指数は材齢 28 日の 86% 及び 91 日の 100% のものを使用した。細骨材は鬼怒川産川砂を、粗骨材は鬼怒川産川砂利を、混和剤はポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した。

表 - 3 にコンクリートの計画調合を示す。F3, P3, P4 とし、単位水量は 170kg/m^3 一定とし、単位粗骨材量も 942kg/m^3 一定とした。特に、F3, P4, P3 の関係については、フライアッシュを P3 のセメントの一部と置換した内割りで F3 になり、また、P4 の細骨材の一部と置換した外割りでも F3 になる。

コンクリートのフレッシュ性状の測定結果は、すべての調合条件で、スランプ $22 \pm 2\text{cm}$ 、空気量 $3 \pm 1.5\%$ に納めた。また、フレッシュ時の単位容積質量は、F3, P3, P4 それぞれ 2.343, 2.336, 2.326 kg/L であった。供試体は、 $10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体で、材齢 1 日で脱型し、その直後から、各種養生条件に従って、測定材齢まで 20 60%RH の水そう付き恒温恒湿室に保管した。圧縮強度試験は、JIS A 1108 に従い、各条件 3 個を供し、単位容積質量も実測した。

3. 実験結果及び考察

3.1 単位容積質量の経時変化

図 - 1 に、すべての実験条件における単位容

表-1 要因と水準

W/C, W/B	<ul style="list-style-type: none"> フライアッシュ混入の有無 有: F3 (W/B=30%, W/C=40%) 無: P3 (W/C=30%), P4 (W/C=40%) 		
養生	種類	水中 (W), 封緘 (S), 気中 (A)	
	条件	<ul style="list-style-type: none"> 養生を変えない条件 (基準養生) W00W, S00S, A00A 材齢7日に養生を切替える条件 W07S, W07A, S07W, S07A, A07W, A07S 材齢28日に養生を切替える条件 W28S, W28A, S28W, S28A, A28W, A28S 	
		[記号説明]	
		例えば、W07Sは、水中養生(W)で、材齢7日に封緘養生(S)に切替えた条件	
材齢(日)	7, 28, 91, 182, 273		

表-2 使用材料の種類及び品質

セメント(C)	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm^3 比表面積: $3330\text{cm}^2/\text{g}$
混和材(FA)	フライアッシュ	密度: 2.24g/cm^3 比表面積: $3890\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材(S)	鬼怒川産川砂	絶乾密度: 2.50g/cm^3 表乾密度: 2.56g/cm^3 吸水率: 2.53%
粗骨材(G)	鬼怒川産川砂利	絶乾密度: 2.52g/cm^3 表乾密度: 2.58g/cm^3 吸水率: 2.41%
混和剤(sp)	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

表-3 コンクリートの計画調合

記号	W/B	W/C	S/a	単位量(kg/m^3)					混和剤 Cx%
	%			W	C	FA	S	G	
F3	30	40	39.6	170	425	142	622	942	0.8
P3	30	30	41.2	170	567	0	670	942	0.8
P4	40	40	45.2	170	425	0	787	942	0.5

積質量の測定結果を示す。材齢 0 日はコンクリートのフレッシュ時の単位容積質量である。W, S, A の各基準養生の経時変化について、理論的には、フレッシュ時から材齢の増加とともに

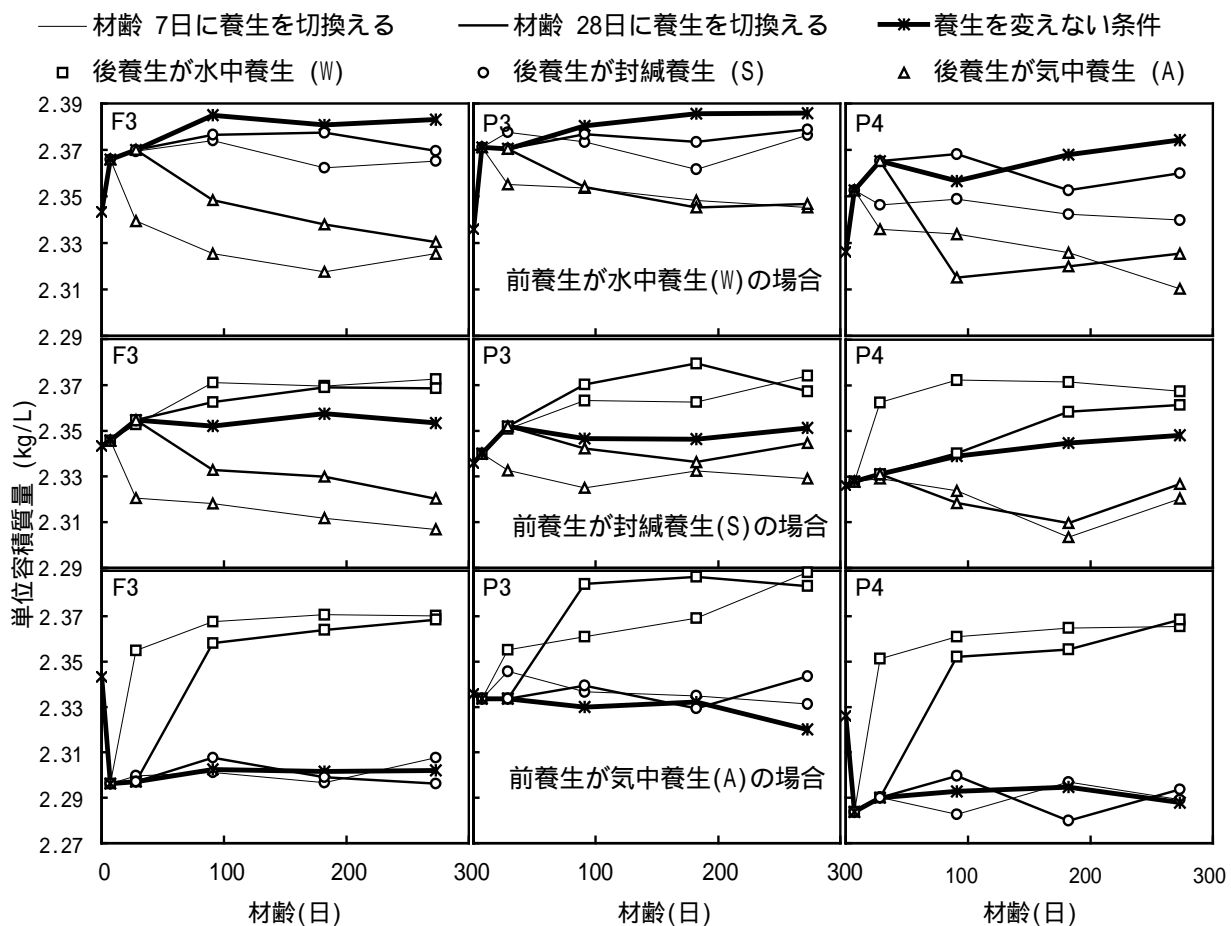


図-1 単位容積質量の経時変化

に、W は単調増加し、S は一定、A は単調減少になる。F3、P3、P4 の 3 調合とも、本結果の W は、フレッシュ時から材齢 7 日で急激に増加し、その後は徐々に増加している。S は、3 調合ともフレッシュ時から急激な変化はなく、実験による多少のバラツキが見られるが、ほぼ一定で推移している。A は、F3 と P4 についてフレッシュ時から材齢 7 日で急激に減少し、その後の変化は小さく推移しているが、P3 はフレッシュ時からの急激な変化は見られず、徐々に減少している。これは、P3 の W/C=30% の高強度域では、内部組織形成に伴う水和反応に必要な水分が当初から不足し、散逸すべき水分があまりなく、S 条件と類似したためと考えられる。逆に W 条件では、水分の不足分を補うため、増分変化が大きく現れたものと考えられる。

材齢 7 及び 28 日に養生を切替えた場合には、3 調合とも、基準養生 W から A にすると、材齢

273 日でフレッシュ時とほぼ同じになり、基準 W から大きく減少した。基準養生 S から A にすると、F3 と P4 で、基準 S から大きく減少したが、P3 では減少変化が小さい。基準養生 A から W にすると、材齢 273 日で、3 調合とも、基準養生 W とほぼ同じになった。

以上より、フライアッシュ混入コンクリートの各種養生条件が及ぼす単位容積質量は、同一 W/C のフライアッシュ無混入コンクリートとほぼ同じ経時変化を示し、当初から乾燥環境下であっても、途中で水分が補給される環境に変わると、長期材齢で、水中養生した場合の単位容積質量とほぼ同じ程度まで回復する。すなわち、フライアッシュが及ぼす単位容積質量への影響はほとんど見られない。また、フライアッシュ無混入の W/C=30% の高強度域では、初期養生環境が乾燥下であっても、封緘養生時とあまり変わらないことがわかった。

表-4 圧縮強度の実測結果(単位：N/mm²)

調合	F3					P3					P4				
	材齢(日)	7	28	91	182	273	7	28	91	182	273	7	28	91	182
W00W	52.8	66.3	85.3	93.2	96.0	67.9	74.2	82.6	88.8	95.3	48.6	61.1	65.7	72.5	77.4
S07W	-	61.7	75.3	83.4	87.7	-	73.4	76.9	85.3	94.9	-	58.0	62.5	69.8	77.3
A07W	-	62.1	71.9	80.3	88.2	-	64.6	76.4	79.5	91.6	-	50.9	58.4	64.9	70.6
S28W	-	-	74.8	80.9	86.2	-	-	83.1	85.7	92.5	-	-	66.3	68.5	78.4
A28W	-	-	69.1	74.2	80.5	-	-	80.1	81.0	92.2	-	-	57.2	62.9	66.6
S00S	53.4	63.9	77.8	81.4	85.3	66.2	71.5	82.5	82.4	87.4	44.6	56.2	64.3	64.3	74.4
A07S	-	47.3	52.7	56.6	62.4	-	52.8	63.2	63.6	70.6	-	37.2	39.5	42.3	47.5
W07S	-	65.3	84.4	91.9	98.1	-	77.2	86.2	89.9	101.2	-	59.4	69.3	71.3	80.7
A28S	-	-	50.5	52.3	56.7	-	-	62.9	63.4	71.0	-	-	43.1	42.2	50.5
W28S	-	-	84.5	90.7	101.6	-	-	85.3	88.9	101.4	-	-	67.6	69.5	77.7
A00A	41.0	52.1	52.4	51.5	55.6	53.4	58.4	64.2	62.8	65.4	32.1	40.2	43.0	46.7	49.5
W07A	-	73.7	73.8	71.5	75.5	-	78.1	87.7	85.2	87.7	-	63.0	68.1	61.3	62.7
S07A	-	64.3	65.0	64.8	67.9	-	72.5	76.3	74.2	77.8	-	59.6	57.6	53.4	60.2
W28A	-	-	88.7	83.1	89.0	-	-	91.1	85.6	90.0	-	-	65.3	67.1	72.3
S28A	-	-	73.0	72.5	77.1	-	-	79.6	79.7	83.4	-	-	64.2	62.4	64.8

3.2 圧縮強度の経時変化

表-4に、すべての実験条件における圧縮強度の測定結果を示す。また、図-2に、各材齢における基準養生下の圧縮強度に対する各養生条件下の圧縮強度比の算定結果を示す。まず、(a)図にW, S, Aの各基準養生下の圧縮強度経時変化に着目する。F3, P3, P4の3調合とも、W及びS養生下では、材齢の増加とともに長期強度も増加しているが、A養生下では、材齢91日以降からの強度変化が小さい。フライアッシュ混入の有無に関わらず、材齢初期から水分が逸散する環境下では、長期の強度発現があまり期待できないことがわかる。

次に、(b)図に材齢7及び28日に養生を切替えた場合の各基準養生との強度比の変化量に着目する。各基準養生からの強度変化の比率は、W/Cが同一のF3とP4で、ほぼ同じ変化挙動となった。すなわち、材齢7日に切替えた各養生条件の材齢273日強度比は、基準WからAでは0.8程度に、基準SからAでも0.8程度に、基準AからWでは1.4~1.6程度になり、材齢28日に切替えた各養生条件の材齢273日強度比は、基準WからAでは0.9程度に、基準Sから

Aでも0.9程度に、基準AからWでは1.4程度に、ほぼ全体的に同じ変化挙動となった。これらは、フライアッシュの混入に伴い、F3とP4の各基準養生下のポテンシャル強度は各々異なるようであるが、各基準養生下のポテンシャル強度から、養生を切替えた場合の各材齢の強度発現効果は、フライアッシュの混入にあまり影響されず、元々のW/Cに依存しているものと推察される。また、P3のW/C=30%の高強度域では、材齢7及び28日に、WからAに、SからAに、各々養生を切替えても、材齢273日の強度比は0.9程度と同じになり、乾燥環境下で水分が散逸する状況よりも、水和反応そのものに必要な水分が不足している状況が読みとれる。

以上より、各基準養生下の圧縮強度はフライアッシュ混入により影響を受けるが、各材齢における基準養生下の強度に対する各養生条件下の強度変化比は、フライアッシュの混入にあまり影響を受けず、元々のW/Cに依存していることがわかった。

3.3 フライアッシュ混入が及ぼす各種養生条件下での長期強度発現への影響

図-3に、フライアッシュが及ぼす各種養生

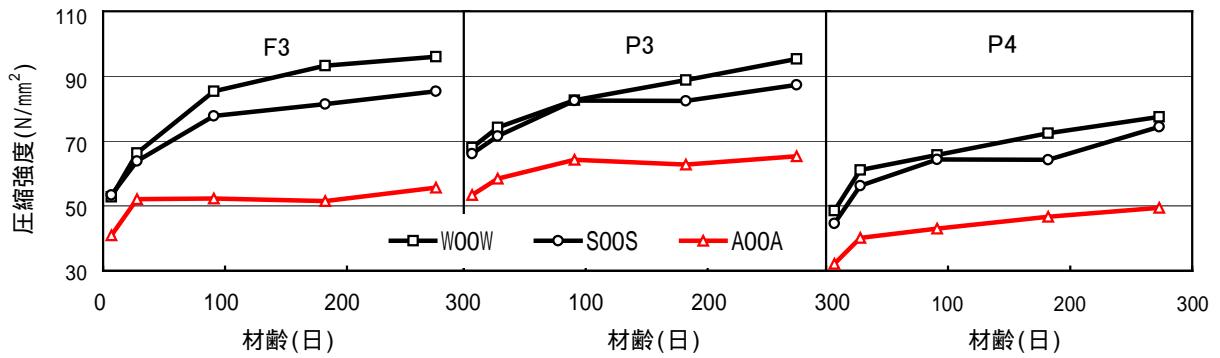


図-2(a) 各種基準養生条件における圧縮強度の経時変化

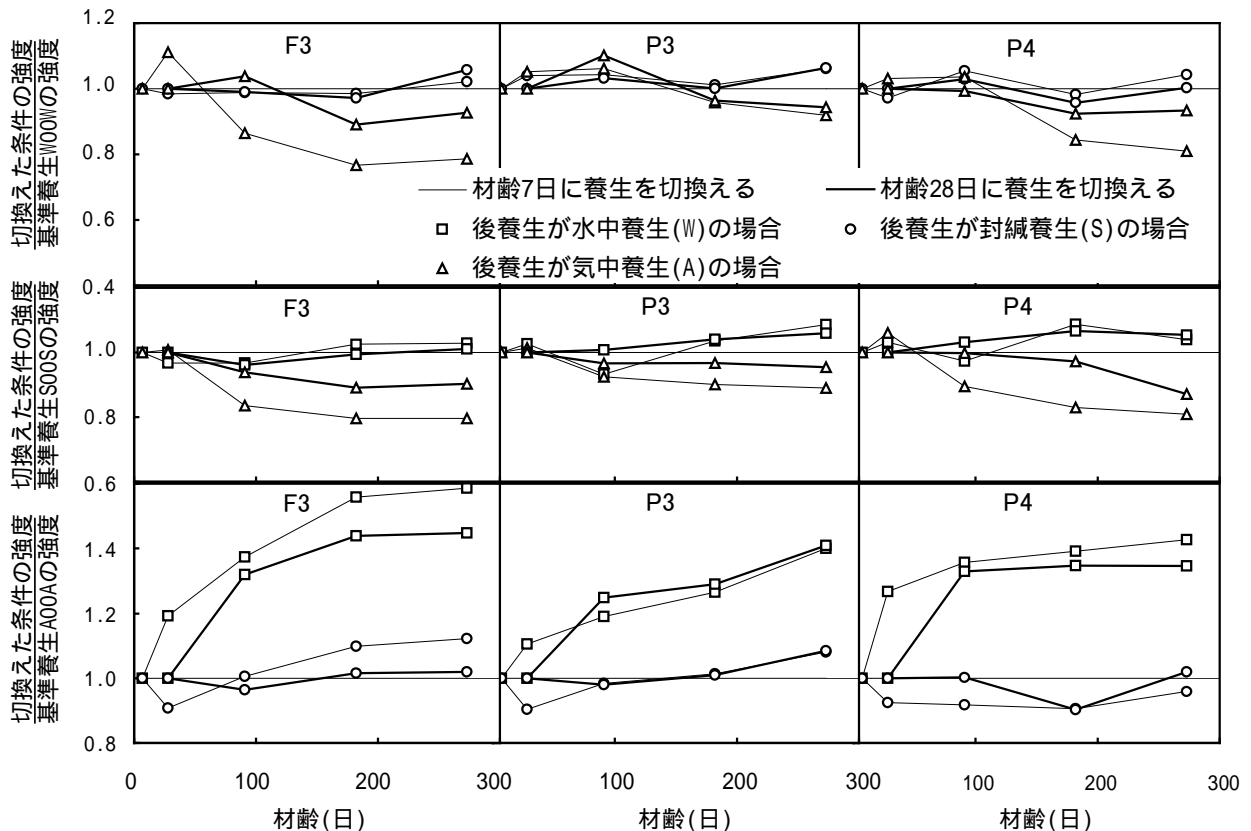


図-2(b) 各材齢における基準養生条件に対する切替えた養生条件の圧縮強度比

条件下での強度発現の寄与率を示す。本図の縦軸は、フライアッシュ混入コンクリートの結合材について、フライアッシュが結合材としてどの程度強度発現に寄与しているのかを表すパラメータを意味し、以下の式(1)で定義した。

$$\text{フライアッシュが及ぼす強度発現寄与率}[\%] = (\text{F3強度} - \text{P4強度}) / (\text{P3強度} - \text{P4強度}) \times 100 \quad (1)$$

材齢7日の若材齢時では、すべての養生条件で、フライアッシュは結合材として約20~40%程度しか機能していない。一方、材齢91日以降

の中・長期材齢にて、フライアッシュが結合材として80%程度機能している養生条件は、W00W, W07S, W28S, W28A, S07W, A07Wが挙げられる。これらは、若材齢時に十分な水分を確保した点が共通している。他の水分が不足しがちな養生条件は、約30~60%で、平坦に経時変化し、長期強度発現への寄与率が、材齢7日の時点とほとんど変わっていない。

以上より、若材齢にて湿潤養生が不足した場合、フライアッシュが結合材として強度発現に寄与する比率は、材齢7日の若材齢時の寄与率

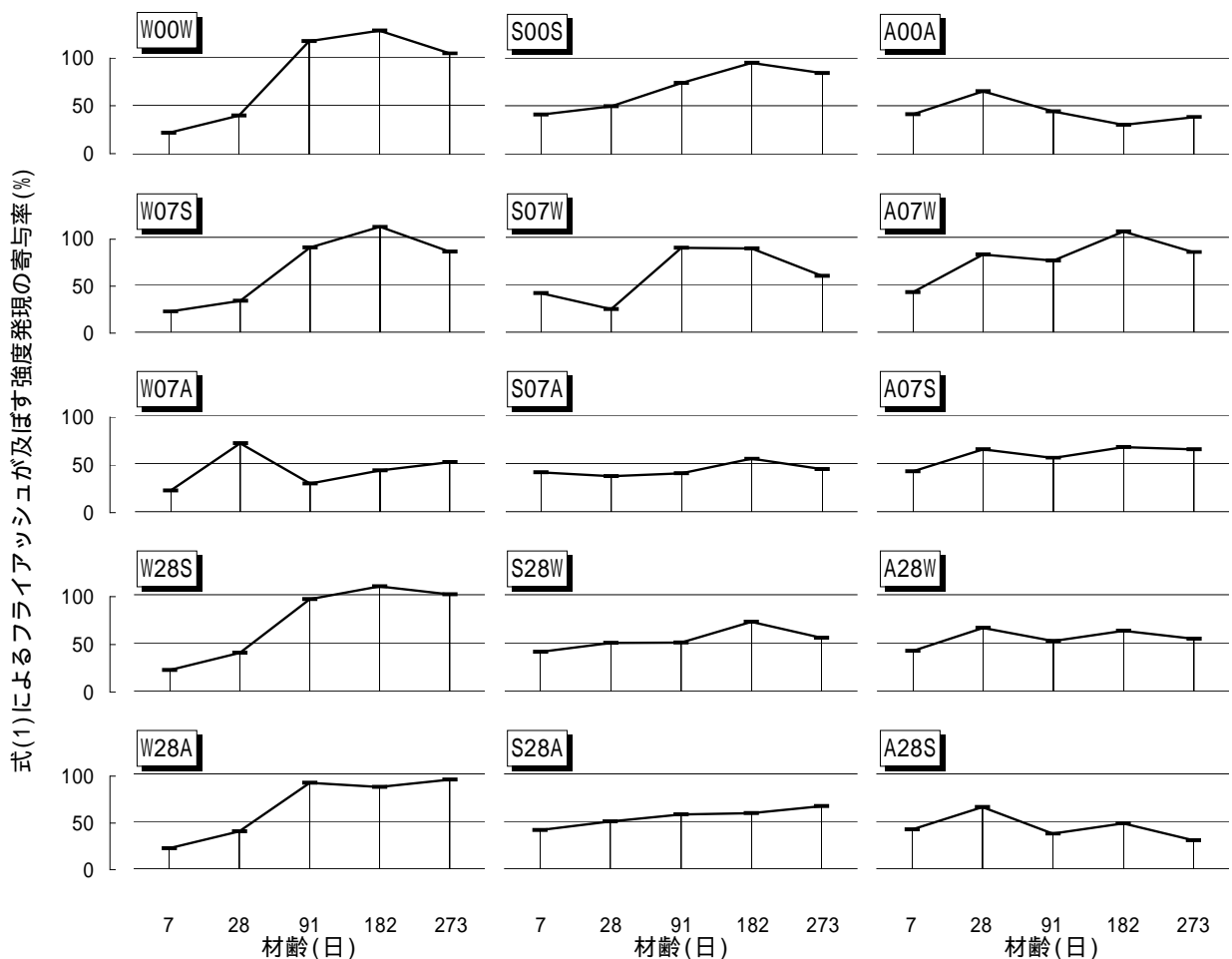


図-3 養生によるフライアッシュの強度発現への効果

約 40%のまま、あまり変化せず、材齢 273 日の長期材齢に至っていることがわかった。

4. まとめ

フライアッシュ混入コンクリートについて、養生を種々の湿潤状態に変化させ、中・長期の強度発現性状を検討した結果、本研究の範囲内で以下のことが示された。

(1) 各種養生条件下における単位容積質量の経時変化は、同一 W/C のフライアッシュ無混入コンクリートとほぼ同じ変化を示し、フライアッシュが及ぼす影響は見られなかった。

(2) 水中、封緘、気中の養生一定下の圧縮強度は、フライアッシュ混入の影響を受けたが、材齢ごとの養生一定下の強度に対する各種養生下の強度変化比は、フライアッシュ混入にあまり影響を受けず、元々の W/C に依存している。

(3) 若材齢で湿潤養生が不足した場合、フラ

イアッシュが結合材として強度発現に寄与する比率は、若材齢時の約 40% から、あまり変化せず、長期材齢に至っている。

謝辞：

本研究の実験実施にあたり、宇都宮大学卒業生の黒滝利通氏に多大な協力を頂きました。

参考文献：

- 1) 榊田佳寛, 手島則夫, 中村成春：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調合と諸性質に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.509, pp.1-7, 1998.7
- 2) 手島則夫, 中村成春, 榊田佳寛：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発熱特性, 日本建築学会構造系論文集, No.508, pp.9-15, 1998.6