論文　フライアッシュを使用したコンクリートの強度発現に及ぼす養生変化の影響

呉　富栄[*1]・桝田　佳寛[*2]・中村　成春[*3]・新沼　大史[*4]

要旨：フライアッシュを使用したコンクリートを対象に，建築工事での利用を考慮した種々の養生条件における強度発現特性を実験的に検討した。その結果，（1）水中養生または封緘養生した場合，フライアッシュを混入したコンクリートは，無混入と比較して，材齢 7～91 日における強度の増加が大きい。（2）フライアッシュの強度寄与効果は，水中養生・封緘養生に関わらず，材齢 14 日間程度以上，湿潤養生した場合に得られる。（3）動弾性係数は，材齢初期から長期間に乾燥の影響を受けると，材齢 28 日試験時よりも，その後も乾燥し続けた方が低下する傾向がみられる。

キーワード：ﾌﾗｲｱｯｼｭ，湿潤養生期間，強度発現，ﾌﾗｲｱｯｼｭ強度寄与率，動弾性係数

1.　はじめに

石炭火力発電所からの副産物であるフライアッシュは，コンクリートの結合材とした場合，土木分野でよく利用されているものの，建築分野では電力施設の RC 工事以外への利用が非常に少ない。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，コンクリート工事でフライアッシュの使用を増やすことが重要となっている。

一方，フライアッシュを使用したコンクリートの初期強度は小さくなり，中・長期強度発現をよくするためには，十分な湿潤養生を施す必要がある。しかし，現行の施工指針（案）[1)]では，フライアッシュを使用したコンクリートに対応する施工管理について，データの蓄積が少ないため，必要な湿潤養生期間が定められていない。このことは，フライアッシュコンクリートの建築工事での利用拡大に障害となっている。そこで，フライアッシュを使用したコンクリートの物性に及ぼす湿潤養生の影響を把握する必要がある。

既往の実験的検討 [2)]によると，高強度コンクリートにおいて，十分な湿潤養生を行った場合，長期になるほどフライアッシュの強度寄与機能が高く，若材齢時から湿潤養生が不足した場合，ほぼ初期材齢のまま経時変化する知見が得られた。しかし，一般の建築工事で使用される水セメント比が大きいコンクリートでは，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，建築工事での利用を考慮した種々の湿潤養生条件における強度発現特性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。フライアッシュ無混入のコンクリートの W/C（水セメント比）が 40%，50%，60%の 3 水準を設け，それぞれ，P4，P5，P6 と表記し，フライアッシュ混入時の比較用基準コンクリートとする。また，フライアッシュ混入コンクリートについて，W/B（水結合材比），W/C がそれぞれ，40%と 50%，50%と 60%の各 2 水準とし，F4-5，F4-6，F5-6 と表記する。

湿潤養生環境は，20℃水中養生(W)と 20℃封緘養生 (S)をベースに，各々7 日，14 日，91 日

*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　宇都宮大学助教授 工学部建設学科 工博 (正会員)
*4　宇都宮大学大学院工学研究科 博士前期課程

の 3 水準と，3 日，7 日，14 日，28 日，91 日の 5 水準の養生期間を設定した。これらの各湿潤養生をした後，所定の強度試験材齢まで 20℃, 60%RH の室内に気中養生(A)とした。

養生条件と試験材齢との組み合わせを**表－2**に示す。ここで，本実験の養生条件は，初期の湿潤養生種類＋湿潤養生期間（湿潤養生のみの場合，湿潤養生期間を 00 と表記）＋湿潤養生から切換えた後の養生種類の記号で表し，全部で 9 養生条件を設定した。なお S07W14A は，実際の建築工事における床のような部材で打ち込み後，水がたまったようなケースを想定し，材齢 7 日で湿潤養生 W に切換えの条件となり，材齢 14 日以降, 気中養生 A としたものである。

表－3 (a) と **(b)** に実験に使用した材料の種類及び品質を示す。細骨材は鬼怒川産の細目砂と粗目砂を質量比 1：2 で混合した川砂を，粗骨材は鬼怒川産川砂利を使用した。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Ⅱ種品（活性度指数は材齢 28 日で 86%，及び 91 日で 100%）を使用した。混和剤はリグニンスルホン酸系の AE 減水剤と，アルキルアリルスルホン化合物系の AE 助剤を使用した。また，フライアッシュ混入コンクリートの場合，AE 助剤は専用薬剤を使用した。

表－4にコンクリートの計画調合およびフレッシュ性状を示す。全ての調合の単位水量は 175kg/m^3 一定とし，単位粗骨材量も 1000kg/m^3 一定とした。フライアッシュの混入量は，それぞれの調合において，W/C と W/B の水準レベルを満足するよう設定した。

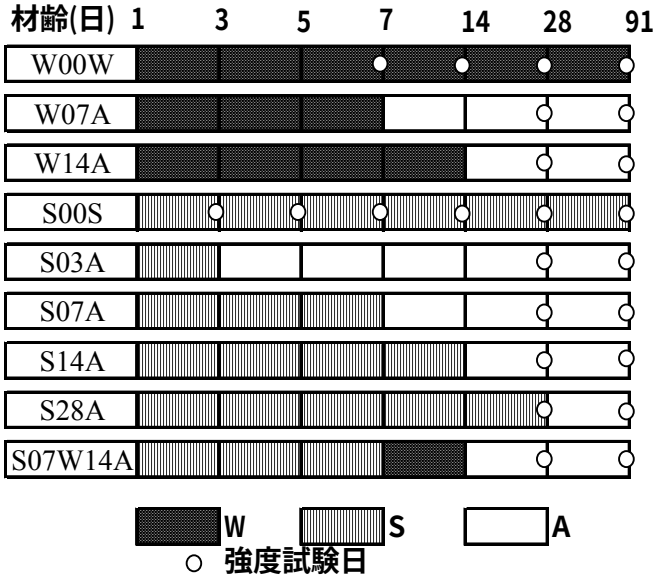
コンクリートのフレッシュ性状の測定結果は，すべての調合で，スランプ 21±1.5cm，空気量 5.0±1.0%であった。打設時期は夏期のため練上温度が 28±2℃であった。供試体は，φ10×20cm の円柱供試体で, 材齢 1 日で脱型し，その直後に，各種養生条件に従って，所定の材齢まで 20℃,60%RH の水そう付き恒温恒湿室に保管した。また，圧縮強度および動弾性係数の測定は，JIS に従い，各条件 3 個を供した。

表－1　要因と水準

調合	ﾌﾗｲｱｯｼｭ無混入	P4，P5，P6 （注１）
	ﾌﾗｲｱｯｼｭ混　入	F4-5，F5-6，F4-6（注２）
湿潤養生期間(日)	水中養生	7，14，91
	封緘養生	3，7，14，28，91
強度試験材齢(日)		3，5，7，14，28，91

注１：例えば, P4 は, フライアッシュが無混入で, W/C が 40%とする。
注２：例えば, F4-5 は, フライアッシュが混入で, W/B が 40%，W/C が 50%とする。

表－2　養生条件と試験材齢との組み合わせ



表－3 (a)　骨材の品質指標値

骨材名称	産地	粗粒率 F.M.	密度(g/cm^3)		吸水率 (%)
			表乾	絶乾	
細目砂(S1)	鬼怒川	2.27	2.56	2.49	2.53
粗目砂(S2)	鬼怒川	2.62	2.54	2.49	2.41
川砂利(G)	鬼怒川	6.67	2.58	2.52	2.41

表－3 (b)　骨材以外の使用材料の品質指標値

	材料名称	品質指標値
C	普通ポルトランドセメント	密度：3.16 g/cm^3, 比表面積：3280 cm^2/g
FA	フライアッシュ（JISⅡ種）	密度：2.24 g/cm^3, 比表面積：3890 cm^2/g
混和剤	AE 減水剤	リグニンスルホン酸系
	AE 助剤	アルキルアリルスルホン化合物系

表－４　コンクリートの計画調合およびフレッシュ性状

記号	W/B (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m^3)						AE 減水剤 C×(%)*	AE 助剤 B×(%)**	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量(kg/L)	ｺﾝｸﾘｰﾄ温度(℃)
				W	C	FA	S1	S2	G						
P4	40	40	39.6	175	438	0	216	432	1000	2.5	0.40	19.0	5.3	2.20	28.5
F4-5		50	38.5		350	88	206	412		3.0	2.80	19.0	5.5	2.21	26.5
F4-6		60	37.7		292	146	200	399		3.0	4.60	19.0	5.1	2.17	27.5
P5	50	50	42.1		350	0	239	479		2.5	0.25	20.5	5.2	2.20	29.5
F5-6		60	41.4		292	58	233	466		2.0	1.50	22.0	5.3	2.18	30.0
P6	60	60	43.6		292	0	255	510		2.5	0.13	20.0	4.9	2.20	27.0

* AE 減水剤の使用量は 10%の希釈溶液の量。

** AE 助剤の使用量は 1%の希釈溶液の量で，フライアッシュ混入の場合は専用薬剤を使用した。

表－５(a)　フライアッシュ無混入コンクリートの圧縮強度実測値（単位：N/mm^2）

調合	P4						P5						P6					
材齢(日)	3	5	7	14	28	91	3	5	7	14	28	91	3	5	7	14	28	91
W00W	-	-	32.0	35.3	39.7	48.0	-	-	23.3	27.6	33.1	41.2	-	-	16.8	21.4	24.3	31.6
S00S	25.2	27.3	31.5	35.8	40.0	47.1	17.0	20.8	24.2	28.3	33.3	39.6	13.6	15.4	18.7	21.9	26.5	31.2
W07A	-	-	-	-	42.1	43.4	-	-	-	-	33.4	35.5	-	-	-	-	26.3	28.4
W14A	-	-	-	-	44.9	46.0	-	-	-	-	35.2	39.0	-	-	-	-	27.8	31.2
S03A	-	-	-	-	36.2	36.7	-	-	-	-	29.8	31.0	-	-	-	-	23.6	25.2
S07A	-	-	-	-	37.1	40.2	-	-	-	-	32.1	34.3	-	-	-	-	26.8	28.6
S14A	-	-	-	-	41.1	43.4	-	-	-	-	33.1	35.6	-	-	-	-	27.8	29.2
S28A	-	-	-	-	-	45.5	-	-	-	-	-	39.1	-	-	-	-	-	32.6
S07W14A	-	-	-	-	42.7	43.9	-	-	-	-	34.9	37.8	-	-	-	-	28.7	31.3

表－５(b)　フライアッシュ混入コンクリートの圧縮強度実測値（単位：N/mm^2）

調合	F4-5						F4-6						F5-6					
材齢(日)	3	5	7	14	28	91	3	5	7	14	28	91	3	5	7	14	28	91
W00W	-	-	25.1	29.1	35.2	46.2	-	-	19.9	24.4	30.5	39.6	-	-	17.2	20.8	25.3	36.5
S00S	16.7	21.1	24.6	29.8	34.8	40.3	11.2	16.5	21.8	25.2	30.7	37.2	13.1	14.7	18.0	21.2	26.3	34.2
W07A	-	-	-	-	34.5	36.3	-	-	-	-	30.8	32.1	-	-	-	-	26.6	29.7
W14A	-	-	-	-	36.1	39.3	-	-	-	-	32.4	34.6	-	-	-	-	27.9	31.2
S03A	-	-	-	-	30.2	30.9	-	-	-	-	25.9	27.3	-	-	-	-	23.6	25.2
S07A	-	-	-	-	32.5	33.2	-	-	-	-	28.6	30.7	-	-	-	-	25.7	28.2
S14A	-	-	-	-	34.5	36.7	-	-	-	-	31.1	34.0	-	-	-	-	27.8	29.9
S28A	-	-	-	-	-	41.1	-	-	-	-	-	37.1	-	-	-	-	-	32.9
S07W14A	-	-	-	-	35.7	38.4	-	-	-	-	31.4	35.2	-	-	-	-	28.4	30.8

3.　実験結果及び考察

3.1 フライアッシュ混入コンクリートの圧縮強度の経時変化

表－５(a),(b)に，それぞれ，フライアッシュ無混入とフライアッシュを混入したコンクリートの全ての養生条件下の圧縮強度測定結果を示す。今回，打ち込み時の外気温が 28℃近くの夏期であったが，材齢に伴う強度の伸びは順調に進んでいることがわかる。

このため，W00W と S00S の湿潤養生条件について，各調合のコンクリートの圧縮強度発現を，材齢 t（日）の対数関数式(1)で表す。**表－６**に各調合の強度発現の回帰結果を示す。

$$fc = a\ln(t) + b \quad (1)$$

ここに，fc：圧縮強度（N/mm^2）

a, b：実験係数

t：材齢（日）

表－６　各調合の強度発現回帰式

	W00W (t:7~91 日)	S00S (t:3~91 日)
P4	$fc = 6.29\ln(t) + 19.2$	$fc = 6.55\ln(t) + 18.0$
P5	$fc = 7.04\ln(t) + 9.42$	$fc = 6.61\ln(t) + 10.5$
P6	$fc = 5.68\ln(t) + 5.88$	$fc = 5.35\ln(t) + 7.75$
F4-5	$fc = 8.52\ln(t) + 7.31$	$fc = 6.94\ln(t) + 10.5$
F4-6	$fc = 7.80\ln(t) + 4.38$	$fc = 7.43\ln(t) + 5.04$
F5-6	$fc = 7.59\ln(t) + 1.40$	$fc = 6.31\ln(t) + 5.35$

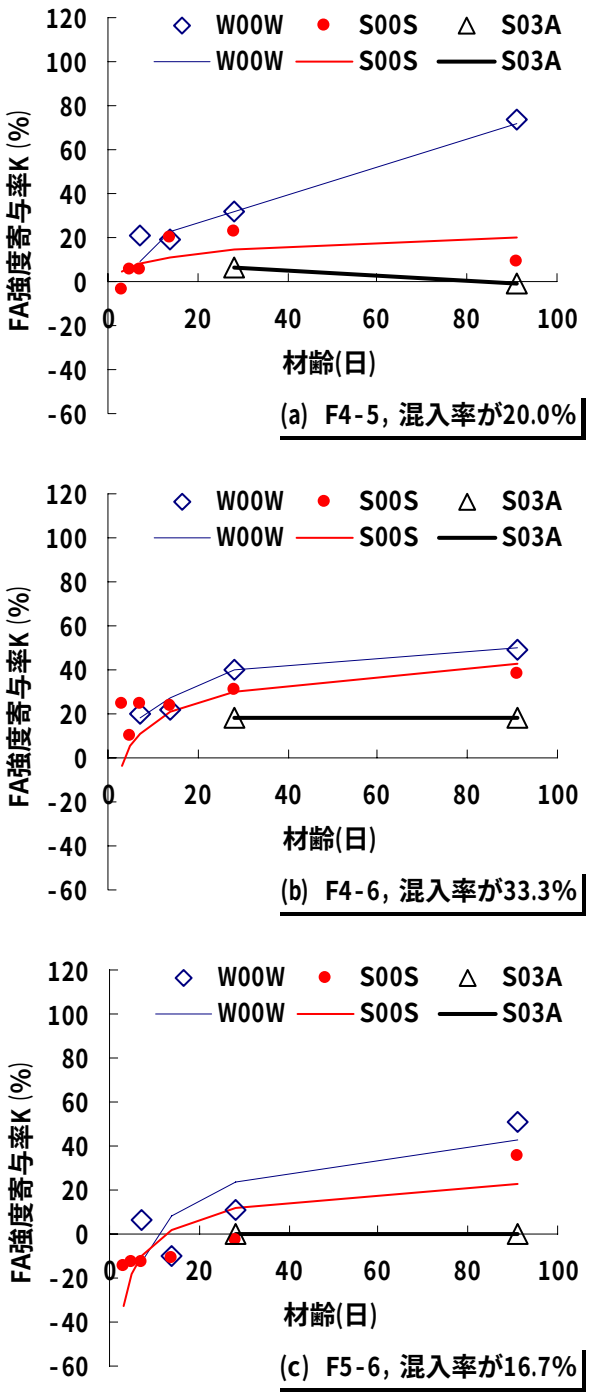
回帰結果より，係数 a は，フライアッシュ無混入コンクリートと比べ，同一 W/C または W/B のフライアッシュ混入コンクリートの方が大きい傾向にある。つまり，W00W，S00S のいずれも，フライアッシュの混入により，材齢 7～91 日におけるコンクリートの強度増加が大きくなることがいえる。

3.2 材齢がフライアッシュの強度寄与率に及ぼす影響

フライアッシュをコンクリートの結合材とみなして，等量のセメントと比べ，どの程度コンクリートの強度発現に寄与しているかを検討するため，以下の式(2)（F4-5 を例として）を用いてフライアッシュの強度寄与率 K [2] を計算した。

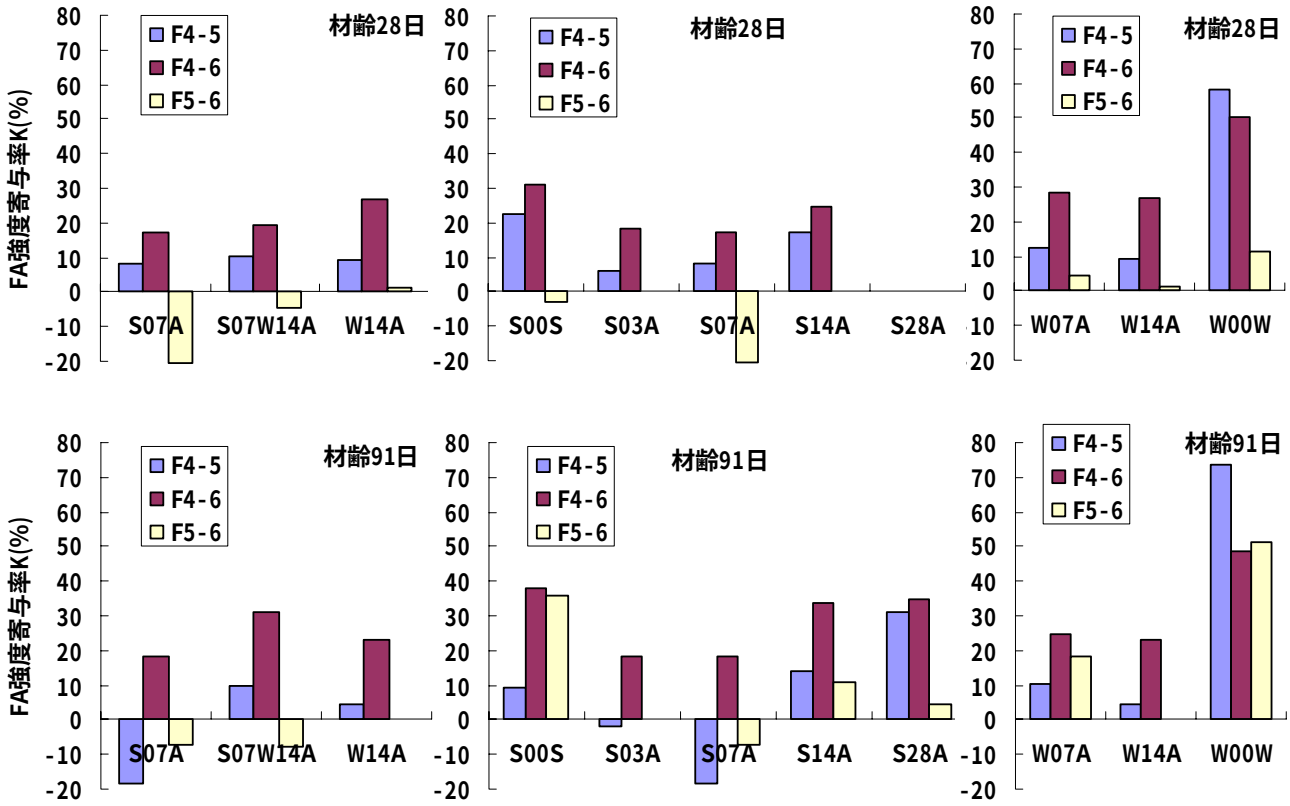
$$K = \frac{(\text{F4-5強度}) - (\text{P5強度})}{(\text{P4強度}) - (\text{P5強度})} \times 100 \quad (2)$$

ここに，K：ﾌﾗｲｱｯｼｭの強度寄与率（%）



図－１　各種養生条件下のフライアッシュ強度寄与率 K の経時変化

図－１(a)，(b)，(c)に，各種養生条件下のフライアッシュ強度寄与率 K の経時変化を示す。図中のマークは，実測結果からの K を，ラインは，**表－６**の回帰結果から K を算出したものである。**図－１**より，フライアッシュの強度寄与率 K は，材齢に関わらず W00W ＞ S00S ＞ S03A となった。特に，湿潤養生が不足している S03A は，長期材齢になっても K が増加することはなく，フライアッシュの強度発現の寄与が期待できないことがわかる。材齢 91 日において，W00W の場合，F4-5, F4-6, F5-6 の K はそれぞれ，71%, 50%, 43%となった。また，S00S の場合，F4-5, F4-6, F5-6 の K は，それぞれ 20%, 43%, 23%となった。



図－２　材齢 28，91 日におけるフライアッシュ強度寄与率 *K* と湿潤養生期間との関係

以上より，十分に湿潤養生した場合の長期材齢では，セメントの水和反応に伴う水酸化カルシウムの生成量が豊富で，フライアッシュとのポゾラン反応を助長している状態が理解できる。ただし，ポゾラン反応を最大限に活性化させるための，最適な調合や養生条件は今回の F5-6, F4-6, F4-5 の結果からは判断しにくい状況にある。

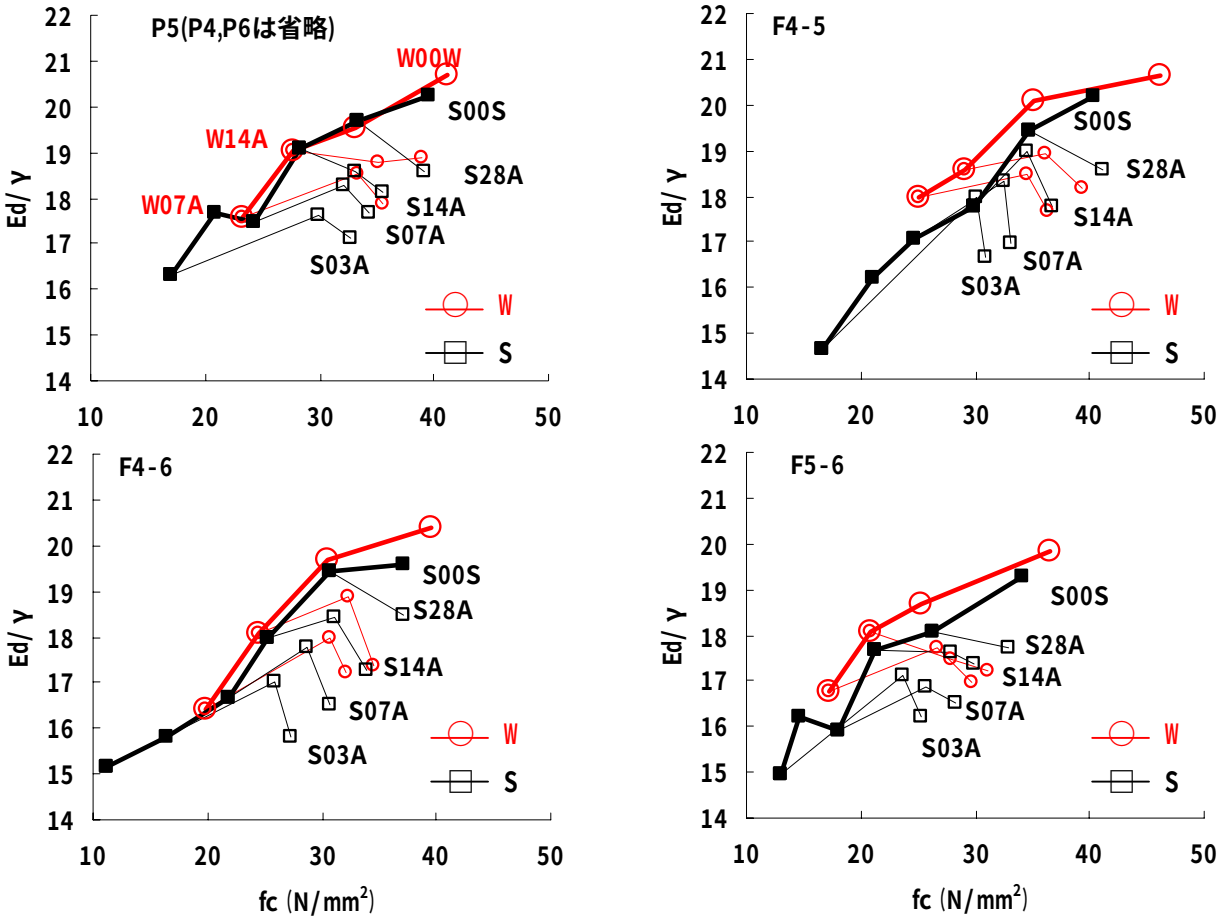
3.3 各種湿潤養生がフライアッシュの強度寄与率に及ぼす影響

一般に，フライアッシュの強度に寄与する機能ポテンシャルを十分発揮させるためには，供試体を封緘にして，コンクリートの湿潤状態を保つ封緘養生(S)方法がある。また，供試体を水中に漬け，水和反応の水分不足を補う水中養生(W)方法もある。初期材齢において，S または W に養生する必要な期間は工事現場の型枠を外す基準となる。

図－２に，材齢 28, 91 日におけるフライアッシュの強度寄与率と湿潤養生期間との関係を示す。材齢 28, 91 日ともに，いずれの調合でもフライアッシュの強度寄与効果がみられるのは，水中養生や封緘養生を問わず, 材齢 14 日間程度, 湿潤養生した場合であることがわかる。このため，封緘で湿潤養生をする場合，必要な湿潤養生期間は 14 日間程度と考えられる。また，S07W14A の場合，ほぼ W14A と同じ程度の効果があると見られる。

3.4 動弾性係数について

一般にコンクリートの動弾性係数 E_d は，圧縮強度 f_c と単位容積質量 γ に影響を受ける。ここでは，実測した動弾性係数 E_d を単位容積質量 γ で除して規準化した動弾性係数 E_d/γ と圧縮強度 f_c との関係を検討した。**図－３**に，E_d/γ と f_c の関係を示す。フライアッシュ混入の有無にかかわらず，いずれの条件でも，材齢初期から長期間に乾燥の影響を受けると，圧縮強度が若干増加するにもかかわらず，材齢 28 日試験時の E_d よりも，その後も乾燥し続けた E_d の方が低下する傾向がみられる。



図－３　単位容積質量で規準化した動弾性係数と圧縮強度の関係

4.　まとめ

本研究の範囲内で以下のことが示された。

(1) 水中養生または封緘養生とした場合，フライアッシュを混入したコンクリートは，無混入と比較して，材齢 7～91 日における強度の増加が大きい。

(2) フライアッシュの強度寄与率 K の経時変化は湿潤養生条件により大きく異なる。材齢初期に湿潤養生が不足した場合，フライアッシュによる長期的な強度発現への寄与は期待できない。

(3) フライアッシュの強度寄与効果は，水中養生・封緘養生に関わらず，材齢 14 日間程度以上，湿潤養生した場合に得られる。

(4) 動弾性係数は，材齢初期から長期間に乾燥の影響を受けると，材齢 28 日試験時よりも，その後も乾燥し続けた方が低下する傾向がみられる。

謝辞：

本研究の実験実施にあたり，石川晋平君（当時宇都宮大学卒論生）ならびに河上浩司氏（当時住友建設 技術研究所）に多大な協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献:

1) 日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針（案）・同解説，1999

2) 呉　富栄，桝田佳寛，中村成春：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.315-320，2002

3) 呉　富栄，中村成春，桝田佳寛，黒滝利通：フライアッシュを使用した高強度コンクリートの長期物性に及ぼす初期養生の影響（その 1～その 3），日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，A-1，pp.813～818，2002