

# 論文 フライアッシュコンクリートの収縮性状とひび割れに関する一実験

安田 正雪<sup>\*1</sup>・阿部 道彦<sup>\*2</sup>・飛坂 基夫<sup>\*3</sup>・荒金 直樹<sup>\*4</sup>

**要旨:**品質が異なる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15~45%置換した、水結合材比27~55%のフライアッシュコンクリートについて、乾燥収縮、自己収縮および収縮ひび割れ試験を行うとともに、自己収縮試験終了後の乾燥による収縮も測定した。この結果、通常のコンクリートと比較して、フライアッシュコンクリートの乾燥収縮率は、フライアッシュの置換率が多く、かつ単位水量が少ない調合ほど小さくなつた。また、自己収縮率も小さくなつた。しかし、フライアッシュコンクリートは、必ずしもひび割れ発生が遅くなるとはいえない。

**キーワード:**フライアッシュ、コンクリート、乾燥収縮、自己収縮、ひび割れ

## 1. はじめに

火力発電所から発生するフライアッシュは海外炭の使用で品質が多様化している他、今後発生量は増大することが予想されており、これらフライアッシュの有効利用のためコンクリートへの大量使用が望まれ、フライアッシュコンクリートの特性についての実験研究が盛んに行われている。しかし、品質の異なるフライアッシュを用いた場合や大量使用した場合のフライアッシュコンクリートの収縮およびひび割れ特性についてはまだ不明な点が多い。

本報は、品質が異なる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15~45%置換したフライアッシュコンクリートと通常のコンクリートを対象に、同一のコンクリート試料から各種試験体を作製して、乾燥収縮、自己収縮および収縮ひび割れ試験を行うとともに、自己収縮試験終了後の乾燥による収縮の測定も行って、フライアッシュコンクリートの各種収縮性状の相互関係、ならびに収縮性状とひび割れの関係について述べたものである。

## 2. 実験計画

コンクリートの水結合材比は27%, 40%および55%の3水準とし、普通ポルトランドセメントの30%を品質が異なる3種類のフライアッシュでそれぞれ置換した他、一部15%, 45%置換したフライアッシュコンクリートについて試験を行った。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。実験は2シリーズに分けて行い、シリーズ1ではW/B=40%について、シリーズ2ではW/B=27%と55%について行った。なお、W/C=40%の通常のコンクリートは、いずれのシリーズでも試験を行った。

### 2.1 使用材料およびコンクリートの調合

使用材料と物性を表-1に、コンクリートの調合を表-2に示す。W/B=40%ではHとMのフライアッシュの置換率を変化させた。コンクリートの目標スランプおよび空気量は、W/B=40%と55%がそれぞれ18±1.5cm, 4.5±1.0%, W/B=27%がそれぞれ25±1.5cm, 3.0±1.0%とした。単位水量は185kg/m<sup>3</sup>を最大とし、No.1~No.9の調合ではAE減水剤を、No.10~No.13の調合では高

\*1 東洋建設(株)総合技術研究所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室長、工博（正会員）

\*3 (財)建材試験センター 中央試験所 上級専門職、工博（正会員）

\*4 東洋建設(株)総合技術研究所美浦研究所材料研究室研究員、工修（正会員）

性能A E減水剤を使用した。

## 2.2 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強制パン型ミキサを用いて行い、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秒間攪拌した後、粗骨材、水と混和剤を投入し90秒間攪拌後、練板に排出した。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秒間攪拌して予めモルタルを製造し、さらに粗骨材を投入して90秒間攪拌後、練板に排出した。これをそれぞれ2回繰り返して、混合したものを試料とした。

フレッシュコンクリートと圧縮強度の試験結果を表-3に示す。同一のコンクリート試料から下記に示す試験の供試体をいずれの調合も各2体作製した。但し、ひび割れ供試体はNo.10とNo.13を除く調合で各3体作製した。

### (1) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は、JIS A 1129(モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法)のコンパレーター方法(検長340mm、精度1/1000mm)に従った。供試体の形状・寸法は10×10×40cmの角柱である。コンクリート供試体は材齢2日に型枠から脱型し、材齢7日まで温度20±1°Cの水中で養生した後、基長と質量を測定し、温度20±1°C、湿度60±3%の室内で乾燥を開始し、材齢6カ月まで長さ変化と質量を測定した。

### (2) 自己収縮試験

JCIの(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法<sup>1)</sup>に準じて行った。供試体の形状・寸法は図-1に示す10×10×40cmの角柱である。ひずみの測定は、型枠中央に予め設置した埋込み型ひずみ計(長さ100mm、見掛けのヤング係数約40N/mm<sup>2</sup>)を用いて行い、コンクリートを打設後、20±1°Cの室内において包装用フィルムおよびビニールで供試体を封かんとした後、直ちに測定を開始し材齢28日まで行った。本報ではこの材齢までの測定値を自己収縮として扱っている。その後、型枠を脱型して、温度20±1°C、

湿度60±3%の室内において、引き続き材齢約6カ月まで自己収縮試験終了後の乾燥による収縮ひずみを測定した。

### (3) 収縮ひび割れ試験

乾燥収縮ひび割れ試験方法<sup>2)</sup>に準じて行った。予めひずみゲージ(長さ6mm)を貼付けた拘束器具にコンクリートを打ち込んでひび割れ供試体とした。ひび割れ供試体を図-2に示す。測定はコンクリート打設直後からひび割れ発生まで

表-1 使用材料と物性

項目	使用材料(記号)	物性
セメント	普通ポルトランドセメント(C)	比重 3.16, ブレーン値 3310cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ (FA)	ブレーンが高いもの: (H) * 2.35, 6510cm <sup>2</sup> /g, 110%, 98%(28d), 103%(91d), 2.3%	
	通常の品質のもの: (M) * 2.27, 3890cm <sup>2</sup> /g, 110%, 90%(28d), 103%(91d), 0.9%	
	強熱減量の大きいもの: (L) * 2.11, 3410cm <sup>2</sup> /g, 90%, 80%(28d), 92%(91d), 8.0%	
水	上水道水(W)	-
細骨材	大井川産川砂(S)	表乾比重 2.59, 吸水率 1.74%
粗骨材	岩瀬産硬質砂岩碎石(G)	表乾比重 2.63, 吸水率 0.80%
混和剤	AE減水剤(Ad1), 高性能AE減水剤(Ad2), 空気量調整剤(AE助)	-

\*: 物性値は、比重、ブレーン値(cm<sup>2</sup>/g)、フローカー比(%)。

活性度指数(28日(%), 91日(%)), 強熱減量(%)の順に示す。

表-2 コンクリートの調合

調合 No.	W/B (%)	W/C (%)	FA (種類 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								
					W		P		S	G	Ad1 (G×%)	Ad2 (G×%)	AE助 (G×%)
					C	FA	C	FA					
1	55	—	—	45.3	178	324	—	790	970	0.25	—	0.007	—
2	55	M 30	48.3	163	207	89	824	970	0.25	—	0.020	—	—
3	78.7	L 30	43.1	185	235	101	723	970	0.25	—	—	0.06	—
4	40	—	—	40.8	185	463	—	658	970	0.25	—	0.01	—
5	57.2	H 30	41.2	175	306	131	668	970	0.25	—	0.043	—	—
6	72.7	—	45.1	188	231	189	686	970	0.25	—	0.07	—	—
7	47.0	—	45.4	183	389	69	648	970	0.25	—	0.02	—	—
8	57.1	M 30	40.1	180	315	135	640	970	0.25	—	0.03	—	—
9	72.6	—	45.0	175	241	197	642	970	0.25	—	0.06	—	—
10	57.1	L 30	38.6	185	324	139	601	970	—	0.9	0.07	—	—
11	27	—	—	47.1	182	600	—	754	860	—	1.5	0.001	—
12	27	H 30	45.3	162	420	180	702	860	—	1.0	0.0015	—	—
13	38.6	M 30	45.1	162	420	180	697	860	—	1.25	0.001	—	—

表-3 コンクリートの物性

調合 No.	スランプ *1 (cm)	スランプ フロー (cm)	空気量 *2 (%)	温度 (°C)	封締養生 7日			標準養生 28日		
					σ₀ *3	E₀ *4	σ₀ *5	σ₀ *3	E₀ *4	—
1	19.0	—	4.1	21.5	30.1	24.7	3.00	41.8	29.1	—
2	16.5	—	4.0	22.5	19.4	23.4	1.83	28.7	26.0	—
3	18.0	—	4.8	23.0	17.9	21.1	1.67	26.0	24.0	—
4	18.0	—	4.9	21.0	41.8	27.6	3.49	53.6	30.9	—
5	19.0	—	4.1	21.0	31.8	24.5	2.75	46.7	27.9	—
6	18.0	—	4.8	21.0	23.6	22.8	2.13	33.2	25.5	—
7	18.5	—	4.5	21.0	38.7	25.9	3.10	48.8	29.7	—
8	18.5	—	4.4	21.0	30.1	24.5	2.64	40.5	25.9	—
9	18.0	—	5.1	20.5	21.4	21.6	2.11	28.7	25.1	—
10	17.5	—	5.3	21.0	28.2	22.4	2.65	37.7	25.7	—
11	24.5	53.5	2.0	23.0	86.1	34.4	5.10	102	37.8	—
12	25.0	50.0	2.2	23.0	64.1	31.1	4.18	90.2	35.0	—
13	25.0	49.0	2.3	23.0	67.1	31.1	4.30	84.9	34.6	—

注) 試験方法

\*1: JIS A 1101 \*2: JIS A 1128 \*3: 圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

\*4: 静弾性係数(KN/mm<sup>2</sup>) \*5: 圧縮強度試験時の1/3の応力時の割線係数

\*5: 割裂引張強度(N/mm<sup>2</sup>) ϕ10×20cm供試体による

行った。型枠の脱型は材齢7日とし、その間の養生は $20 \pm 1$  °Cの室内で封かん養生とした。また、自由収縮の測定に用いた供試体の形状・寸法は $10 \times 10 \times 40$  cmの角柱であり、養生はひび割れ供試体と同一とし、材齢7日に型枠を脱型した後、基長を測定した。ひずみの測定は、JIS A 1129に従ってコンタクトゲージ方法(検長200 mm、精度1/1000 mm)で行った。自由収縮の測定は材齢約6カ月まで行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 乾燥収縮率

図-3に、水結合材比と保存期間26週における乾燥収縮率の関係を示す。 $W/B=55\%$ ではフライアッシュコンクリートの乾燥収縮率は、普通セメントのみを使用した通常のコンクリートと比較して小さい結果となったが、 $W/B=40\%$ の一部や $27\%$ では逆に大きい結果となった。この理由としては、図-4及び図-5に示す質量減少率や静弾性係数の影響より、図-6に示すように単位水量の影響が大きいと考えられる。

#### 3.2 自己収縮率と試験終了後の乾燥による収縮率

図-7に、自己収縮率と試験終了後の乾燥による収縮率の経時変化を示す。自己収縮率はNa12およびNa13のものを除いて材齢4週ではほぼ一定となり、その後の乾燥によってさらに収縮し、材齢約6カ月ではほぼ一定となった。

図-8に、水結合材比と材齢28日における自

己収縮率の関係を示す。フライアッシュコンクリートの自己収縮率は通常のコンクリートと比較して小さく、置換率が多くなるほど小さくなる傾向がある。この理由として、フライアッシュ

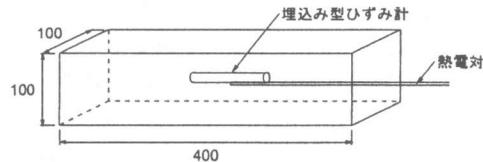


図-1 自己収縮測定用供試体[各2体]

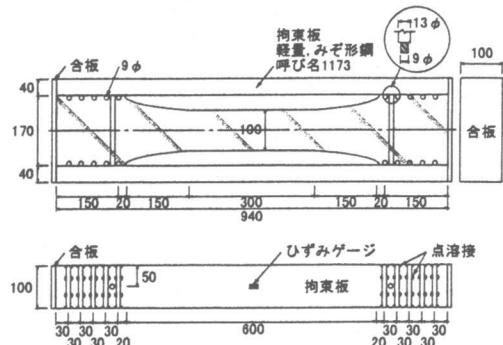


図-2 ひび割れ供試体[3体]

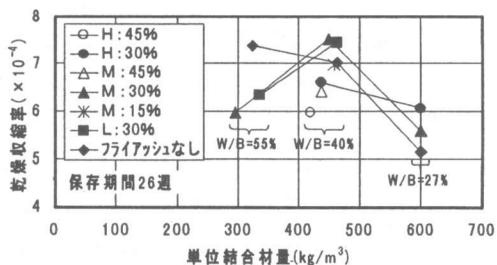


図-3 水結合材比と乾燥収縮率の関係

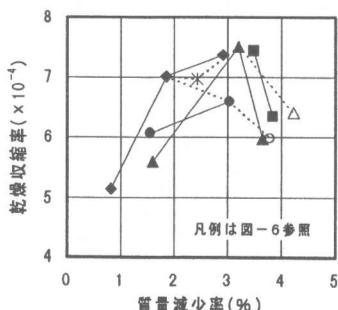


図-4 質量減少率と乾燥収縮率の関係

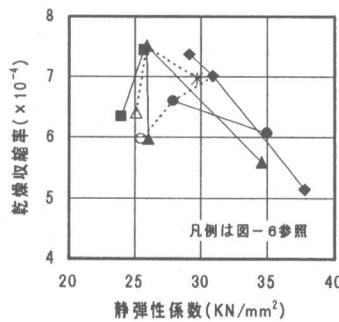


図-5 静弾性係数と乾燥収縮率の関係

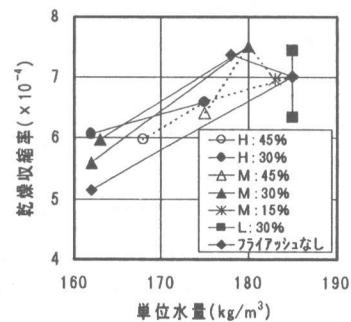


図-6 単位水量と乾燥収縮率の関係

ュの結合材としての効果の違いが考えられる。しかし、フライアッシュの品質の違いによる差は大きくない。

図-9に、自己収縮率と試験終了後の乾燥による収縮率との関係を示す。フライアッシュコンクリートは自己収縮率が小さくても、乾燥による収縮率は大きいことがわかる。

### 3.3 ひび割れ発生日数、自由収縮率

図-10に、水結合材比と平均ひび割れ発生日数の関係を示す。ひび割れ発生日数は水結合材比が小さくなるほど早い傾向が認められた。同一水結合材比の場合には、通常のコンクリートと比較して、W/B=55%ではLのフライアッシュコンクリートのひび割れ発生が早かった。W/B=40%ではMの置換率15%やHの置換率30%と45%のもののひび割れ発生日数は同等で、Mの置換率30%と45%のものは遅くなった。W/B=27%ではHのものは早かった。なお、W/C=40%の通常のコンクリートの平均ひび割れ発生日数は、シリーズ1が13.1日であり、シリーズ2が15.6日であった。

ひび割れ発生日数には、養生期間中のひずみが大きく寄与している<sup>3)</sup>と考えられることから、全ひずみに対する養生期間中のひずみの比との関係を図-11に示した。ここで、全ひずみとは、コンクリート打設からひび割れ発生時までの拘束器具のひずみ、すなわち養生期間中の収縮ひずみと乾燥開始からひび割れ発生までの収縮ひずみの合計のことである。この図から、フライアッシュコンクリートでは、全ひずみに対する養生期間中のひずみの割合が大きいほどひび割れ発生日数が早い傾向が認められるものの、フライアッシュコンクリートのひび割れ発生日数が通常のコンクリートと比較して早くなかった理由については明らかではない。なお、養生期間中の拘束器具のひずみは、図-12に示すように自己収縮と相関性が高い。

次に、ひび割れ発生には引張り伸びひずみ( $\varepsilon_t - \varepsilon_c$ )やクリープひずみ( $\varepsilon_c$ )も大きく寄与している<sup>4)</sup>と考えられることから、乾燥開始

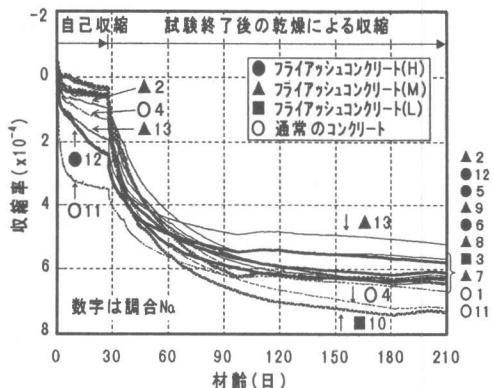


図-7 収縮率の経時変化

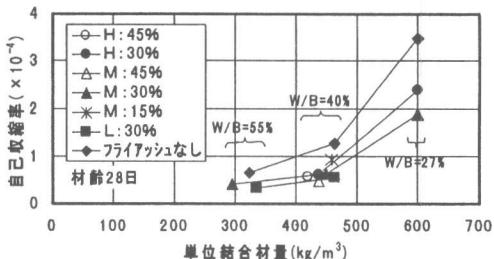


図-8 水結合材比と自己収縮率の関係

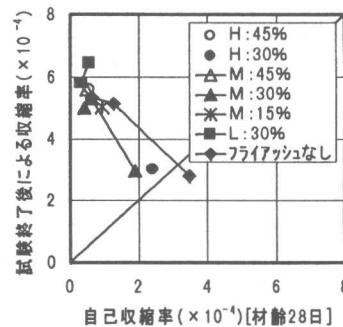


図-9 自己収縮率と試験終了後の乾燥による収縮率の関係

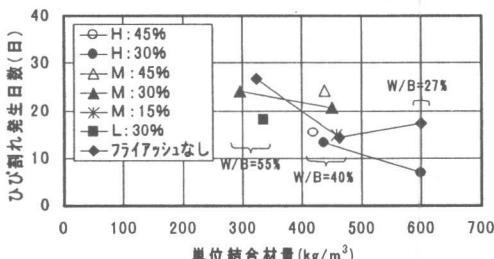


図-10 水結合材比とひび割れ発生日数の関係

以降を対象として拘束器具のひずみをコンクリートの収縮ひずみとみなして、ひび割れ発生直前の各値を(1)式により求め、それぞれ図-13に示した。

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_t - \varepsilon_r) - (\sigma_r / E_c) \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_t$ :自由収縮ひずみ、

$\varepsilon_r$ :拘束器具のひずみ、

$\sigma_r$ :拘束収縮応力度、

$E_c$ :コンクリートの静弾性係数(材齢7日)

この図によると、同一水結合材比では、ひび割れ発生日数の遅いコンクリートのほうが引張り伸びひずみやクリープひずみが大きい傾向があり、このことは伸び能力が大きいことを意味している。 $W/B$ が小さくなると、養生期間中初期の引張り伸びひずみやクリープひずみを考慮する必要はあるが、図-14に示すように $W/B=27\%$ のHのフライアッシュコンクリートの拘束器具のひずみは乾燥開始後、急激に収縮しており、コンクリートの収縮速度や強度発現も、ひび割れ発生に大きく関与していたものと思われる。

なお、材齢28日圧縮強度と材齢7日の脆度係数から材齢28日の割裂引張強度を推定し、この値に対するひび割れ発生直前の応力(拘束器具のひずみから算出)との比を求めた。この結果、 $W/B=40\%$ では56~87%の範囲にあったが、フライアッシュの置換率が大きくなるほど、かつHよりもMのフライアッシュコンクリートのほうが、比率は大きくなつた。 $W/B=55\%$ においても、No.1が69%に対して、No.2が88%, No.3が82%であり、フライアッシュコンクリートのほうが大きかった。 $W/B=27\%$ ではNo.12のひび割れ発生が早かつたこともあり、No.11が53%に対して、No.12が47%であった。

以上のように、本実験の範囲では、同一の水結合材比において普通セメントの一部をフライアッシュに置換することでフライアッシュコンクリートの初期材齢における弾性係数や乾燥収縮が小さくなつても、必ずしもひび割れ発生は遅くなるとはいえない。従つて、フライアッシュ

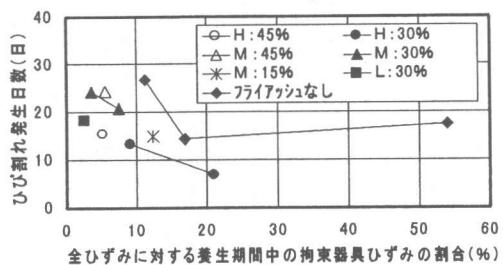


図-11 ひび割れ発生日数に及ぼす  
養生期間中の影響

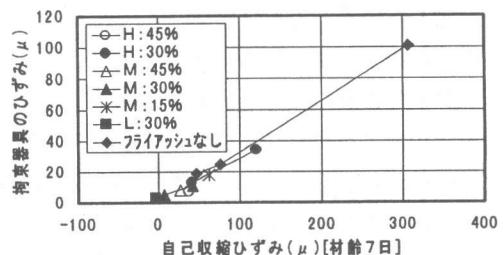


図-12 自己収縮ひずみと養生期間中の  
拘束器具ひずみの関係

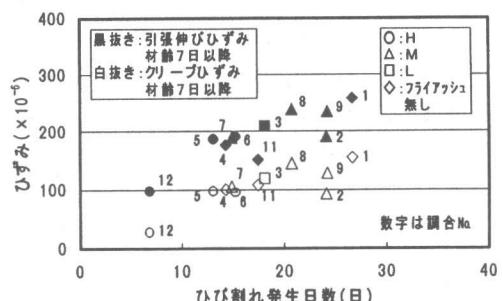


図-13 ひび割れ発生時の  
引張伸びひずみとクリープひずみ

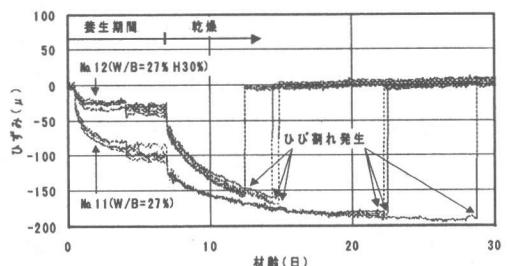


図-14 拘束器具のひずみの経時変化

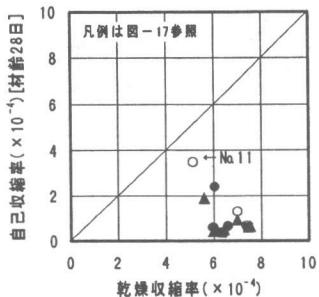
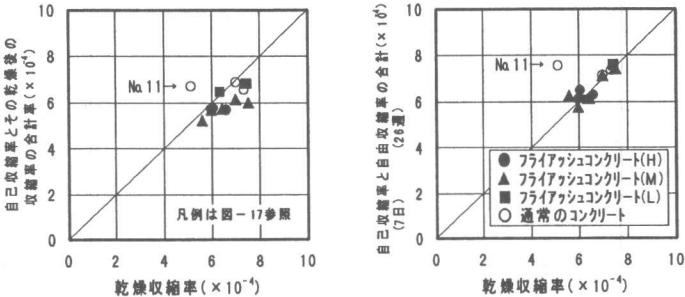
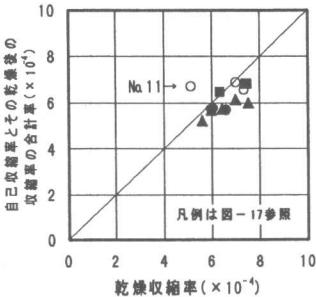


図-15 試験結果の関係(その1) 図-16 試験結果の関係(その2) 図-17 試験結果の関係(その3)



ュの品質や調合条件に留意する必要があることを示唆しているものといえる。

### 3.4 各種収縮率の関係

保存期間26週の乾燥収縮率と材齢28日の自己収縮率の関係を図-15に示す。通常のコンクリートは乾燥収縮率と自己収縮率の間には負の相関が認められるが、フライッシュコンクリートのそれは明確でない。一方、図-16によると、乾燥収縮率は、自己収縮率とその後の乾燥による乾燥期間26週の収縮率の合計と比較してやや小さいといえる。図-17では、乾燥収縮率と材齢7日までの自己収縮率に保存期間26週の自由収縮率を合計したものとを比較した。後者は一般の施工条件に近いものと考えられる。これにより、W/C=27%の通常のコンクリートを除くと、両者はほぼ等しいことがわかる。以上のことから、フライッシュコンクリートについても、JISの乾燥収縮試験方法で収縮量の絶対評価が可能であると考えられる。

### 4.まとめ

フライッシュコンクリートについて本実験の範囲で得られた結果は、以下のとおりである。

- (1)乾燥収縮率は、単位水量の影響が大きくその他の要因は小さい。
- (2)自己収縮率は、通常のコンクリートよりも小さい。
- (3)自己収縮率よりもその後の乾燥による収縮率のほうが大きい。
- (4)ひび割れ発生日数は、通常のコンクリート

と比較して早くなることもあり、コンクリートの伸び能力の影響が大きい。

(5)乾燥収縮率は、自己収縮率とその後の乾燥による収縮率の合計と比較してやや小さい。

なお、本報は日本建築学会・フライッシュコンクリート調査研究小委員会(主査：川瀬清孝新潟大学教授)の活動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。

実験の協力を頂いた、建材試験センター柳氏、鈴木氏、建築研究所部外研究員大下氏、藤田氏、全生連の伊藤氏、八洋コンクリートコンサルタントの桜井氏に感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1)「超流動コンクリート研究委員会 報告書Ⅱ」：日本コンクリート工学会 1994.5
- 2)ひび割れ研究会「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」セメント・コンクリート, pp. 66~68. 1991
- 3)安田正雪, 阿部道彦, 笹原厚, 桃谷智樹：各種高流動コンクリートの収縮性状とひび割れに関する一実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, pp. 147~152, 1996
- 4)真野孝次, 飛坂基夫, 神田彰久, 安田正雪, 大野義照：コンクリートのひび割れ発生に及ぼすセメントの種類とスランプの影響, セメント・コンクリート論文集No.43, pp. 204~209, 1989