論文　フライアッシュがモルタル･コンクリートの乾燥収縮ひび割れ特性に及ぼす影響

蒋　海燕[*1]・佐藤　嘉昭[*2]・上田　賢司[*3]・大谷　俊浩[*4]

要旨：フライアッシュを混入したモルタル・コンクリートの乾燥収縮ひび割れに対する抵抗性について，フレッシュ性状および強度が同程度の供試体による検討を行った。コンクリート供試体によるひび割れ試験は，拘束率制御型試験機を用いて行い，フライアッシュを 20%置換すると応力が緩和されひび割れの発生が若干遅くなった。モルタル供試体によるひび割れ試験は，内部拘束型による一軸拘束試験を行ったが，フライアッシュの影響については明確な結論を得ることが出来なかった。コンクリート供試体とモルタル供試体では同様の結果は得られなかったが，フライアッシュが乾燥収縮ひび割れ特性に及ぼす影響はあまり大きくない。

キーワード：乾燥収縮ひずみ，拘束ひび割れ試験，改質フライアッシュ，直接引張強度

1. はじめに

産業廃棄物であるフライアッシュ（以下，FA と示す）は，コンクリートに混入すると単位水量の低減や水和熱の抑制，ポゾラン反応による強度の増進や耐久性能の向上が期待できる材料であり，エコマテリアルとしての有効利用が望まれている。しかしながら，収縮ひび割れ抵抗性能に関しては，十分な知見が得られていない。

著者らも FA コンクリートについて，材齢 28 日の圧縮強度が基準コンクリートとほぼ同一になる条件で拘束率制御型試験機を使用した収縮ひび割れ試験を行った [1)]。しかしながら，単位水量は同一としたこともあり，FA 混入によるひび割れ抑制効果は見られなかった。そこで，本研究では，FA コンクリートの材齢 28 日の圧縮強度が基準コンクリートと同一になるようにするとともに，FA の流動性改善効果を考慮して単位水量を低減した条件下で，乾燥収縮ひび割れ試験を行うことにした。さらに，コンクリートから粗骨材を除いたモルタル供試体によるひび割れ試験を行い，コンクリートによる試験結果と比較することにした。

2. コンクリート供試体による実験

2.1 実験計画

FA が乾燥収縮ひび割れに及ぼす影響を明らかにするため，FA の置換率を変化させ，圧縮強度およびフレッシュ性状が基準コンクリートとほぼ同じになるコンクリートを用いて，拘束率制御型試験機 [2)]を用いた乾燥収縮ひび割れ実験を計画した。また，同時に圧縮強度，割裂張強度，直接引張強度，乾燥収縮ひずみ試験を行った。

2.2 使用材料および調合

実験に使用したコンクリートの使用材料を**表-1** に，調合を**表-2** に示す。FA は加熱処理を行うことによって強熱減量を 1%以下に低減した改質 FA[3)]を使用した。FA の置換率は 10，20%とし，基準コンクリート(N)に対して材齢 28 日の圧縮強度が同じになるように，既報 [4)]の結果を参考に FA の強度寄与率を 0.3 として W/C を決定した。また，単位粗骨材量が一定の条件で，混和剤使用量を結合材の質量比で一定とし，FA コンクリートのスランプが N と同程度になるように単位水量を調整した。その結果，F10 で 3kg/m^3，F20 で 5kg/m^3 低減されている。

表-1　使用材料

種類	記号	使用材料および物性
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm^3）
混和材	FA	改質フライアッシュ（強熱減量：0.6%，密度：2.21g/cm^3，ブレーン比表面積：3820cm^2/g）
細骨材	S	混合砂（表乾密度：2.62 g/cm^3，吸水率：2.81%，粗粒率：2.46）
粗骨材	G	硬質砂岩砕石（表乾密度：2.66 g/cm^3，吸水率：0.58%，粗粒率：3.73）
混和剤	Ad1	AE 減水剤標準形(リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体)
空気量調整剤	Ad2	AE 助剤(アルキルエーテル系)

表-2　コンクリートの調合

調合	W/B (%)	W/C (%)	FA/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)					Ad1 (%)	Ad2*
					W	C	FA	S	G		
N	55.0	55.0	0	48.4	178	324	0	831	919	0.25	0.75A
F10	51.3	57.0	10	47.8	175	307	34	813	919	0.25	1.00A
F20	47.4	59.2	20	47.0	173	292	73	788	919	0.25	1.50A

*1A=B×0.001%

*1 大分大学大学院　工学研究科博士後期課程　修士(工学)　(学生会員)
*2 大分大学　工学部福祉環境工学科建築コース　教授　工博　(正会員)
*3 (株)ゼロテクノ　技術部　博士(工学)　(正会員)
*4 大分大学　工学部福祉環境工学科建築コース　准教授　博士(工学)　(正会員)

表-3　強度試験結果

調合	フレッシュ性状			圧縮強度試験						割裂引張強度試験		直接引張強度試験	
	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	強度 (N/mm²)				ヤング係数 (kN/mm²)		強度 (N/mm²)		強度 (N/mm²)	ヤング係数 (kN/mm²)
				1 日	3 日	7 日	28 日	7 日	28 日	7 日	28 日	7 日	
N	19.2	4.8	22.0	6.9	18.1	26.3	36.6	27.6	30.5	2.27	2.77	2.46	24.6
F10	19.5	4.9	22.0	6.5	14.5	23.9	35.6	26.8	29.9	2.27	2.76	2.48	24.2
F20	19.0	4.4	23.0	6.2	14.6	23.1	36.1	27.0	29.0	2.40	2.79	2.47	23.8

表-4　ひび割れ発生時の測定結果

調合	ひび割れ発生期間 (日)	拘束ひずみ (×10⁻⁶)	自由収縮ひずみ (×10⁻⁶)	拘束引張ひずみ (×10⁻⁶)	拘束応力 (N/mm²)	最大拘束応力 (N/mm²)	材齢 7 日引張強度 (N/mm²)	引張強度 (ひび割れ発生時) (N/mm²)	応力強度比 (拘束応力/材齢 7 日引張強度)	応力強度比 (拘束応力/試験後引張強度)
N	2.1	−23	112	90	1.42	1.42	2.46	1.87	0.58	0.76
	4.0	−31	153	121	1.39	1.43		1.77	0.57	0.79
F10	3.2	−25	125	100	1.52	1.53	2.48	1.73	0.61	0.88
	4.0	−28	141	113	1.42	1.45		1.73	0.57	0.82
F20	6.6	−34	183	149	1.23	1.39	2.47	1.87	0.50	0.66
	9.1	−41	220	180	1.13	1.38		1.66	0.46	0.68

2.3 コンクリートの打設および養生方法

コンクリートの混練には 2 軸ミキサを使用し，練混ぜ時間は 2 分間とした。圧縮強度，割裂引張強度および乾燥収縮ひずみの供試体は材齢 1 日で脱型後，所定の材齢まで標準水中養生とし，その他の供試体は材齢 7 日まで封かん養生とした。

2.4 実験方法

(1) 各種強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準じ，試験材齢は 1, 3, 7, 28 日とした。また，コンプレッソメータを用いてひずみの測定を行い，ヤング係数を算出した。割裂引張強度は JIS A 1113 に準じ，試験材齢は 7, 28 日とした。直接引張強度試験は，拘束率制御型試験機を用いて材齢 7 日で行った。いずれの試験も 3 体の供試体を用いた。

(2) 拘束ひび割れおよび乾燥収縮試験

拘束ひび割れ試験は，拘束率制御型試験機を用いて行った。この装置は設定した拘束率に応じて自由収縮ひずみのデータから拘束供試体のひずみを制御することができ，ロードセルによって直接応力の経時変化を得ることができる。拘束ひび割れ試験に用いた供試体は JIS A 1151 に準じる形状のもので各調合 2 体とした。拘束供試体の拘束率制御のための自由収縮ひずみは 100×100×600mm の角柱供試体を 3 体用意し，その平均値を自由収縮ひずみとした。ひずみの測定には小型埋込みゲージ（形状 φ8×60mm）を使用し，拘束供試体のひずみが自由収縮ひずみの 20%（拘束度 80%）で一定となるように制御を行った。さらに，拘束ひび割れ試験の供試体と同時に乾燥開始した供試体を用意し，拘束ひび割れ試験の供試体 1 体目にひび割れが発生した時点で 1 体を用い，2 体目にひび割れが発生した時点で 3 体の供試体を用いて直接引張強度試験を行った。乾燥収縮ひずみ試験は JIS A 1129-2 に準じて行った。なお，これらの試験は，恒温恒湿室（温度 20±1℃，湿度 60±5%R.H.）内で行った。

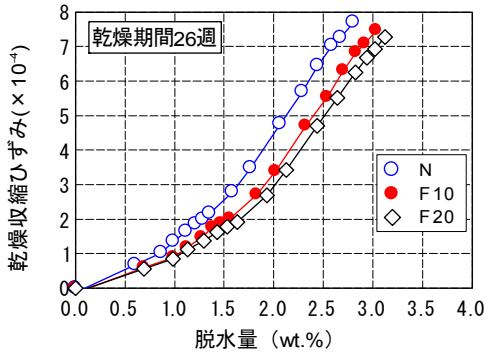

図-1　乾燥収縮ひずみと脱水量の関係

2.5 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状および各種強度

フレッシュ性状および圧縮強度試験結果を**表-3** に示す。スランプおよび空気量ともに，F10 および F20 は N と同程度である。圧縮強度に関しては，初期材齢では FA の置換率が大きい場合，N に対して強度は小さいが，材齢 28 日では同程度である。割裂引張強度および直接引張強度に関しても，調合間の差は小さい。

(2) 乾燥収縮ひずみおよび脱水量

乾燥期間 26 週までの乾燥収縮ひずみと脱水量の関係を**図-1** に示す。FA の置換率が大きいほど単位水量は小さくなるが，W/C が大きくなるために脱水量は大きくなる。乾燥収縮ひずみに及ぼす FA の影響に関しては，大差はないが，FA 置換率が大きいほど単位水量は小さいため，若干小さくなる。

(3) 拘束ひび割れ試験

ひび割れ発生時の測定結果を**表-4**，拘束応力および収縮ひずみの経時変化を**図-2** に示す。表中には，材齢 7 日の直接引張強度およびひび割れ発生時の直接引張強度，また，測定期間中の最大拘束応力をひび割れ発生時の直接引張強度で除した応力強度比も示している。ひび割れ

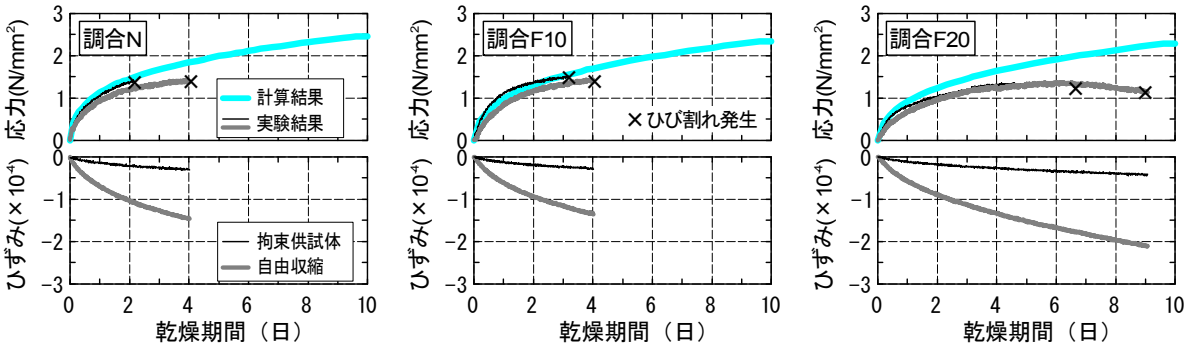

図-2 拘束応力および収縮ひずみの経時変化

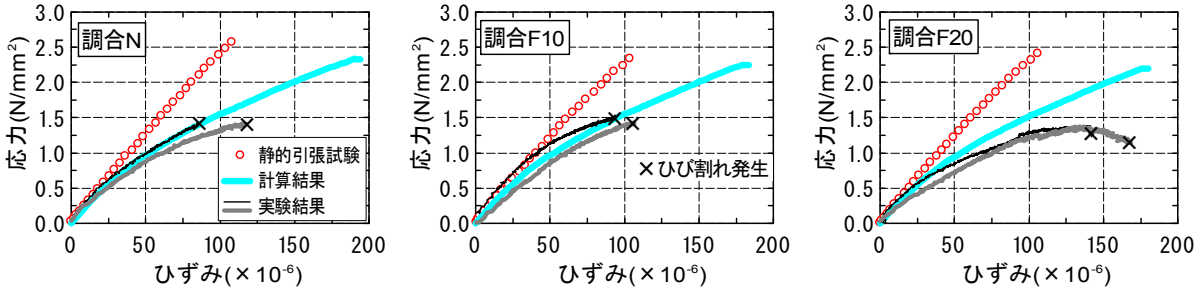

図-3 「応力ーひずみ」曲線

の発生は，N および F10 では大きな差はないが，F20 が若干遅くなった。

図中の計算値は，拘束ひび割れ供試体に生じる収縮拘束応力を式(1)に示す有効ヤング係数法[5]によって算出した。ここで，クリープひずみは式(2)に示す日本建築学会式[5]を用い，自由収縮ひずみは実測値，拘束度は 80%とした。ヤング係数に関しては，材齢 7 日から乾燥開始したコンクリートの引張ヤング係数の経時変化は小さく，ほぼ一定である[6]ことから，材齢 7 日の値を用いた。

$$\sigma_{st} = \sum \frac{E(t')}{(1+\phi(t,t'))}\lambda(t')\Delta\varepsilon_f(t') \qquad (1)$$
$$\phi(t,t') = C(t,t')\cdot E(t')$$

$$C(t,t_0) = CR\cdot\log_e(t-t_0+1)$$
$$CR = (6.8\cdot x - 0.12\cdot G + 17.5)\cdot(t_0)^{-0.33} \cdot\left(1-\frac{h}{100}\right)^{0.36}\cdot(V/S)^{-0.43} \qquad (2)$$

ここに，σ_{st}：収縮拘束応力の計算値（N/mm²），$E(t')$：材齢 t'におけるヤング係数（N/mm²），$\varphi(t, t')$：材齢 t'で載荷した材齢 t におけるクリープ係数，$\lambda(t')$：載荷材齢 t'における拘束度，$\Delta\varepsilon_f(t')$：材齢 t'における自由収縮ひずみ変化，t_0：乾燥開始材齢（日），$C(t, t_0)$：スペシフィッククリープひずみ（×10⁻⁶/（N/mm²）），x：水セメント比（%），G：単位粗骨材量（kg/m³），h：相対湿度（%），V/S：体積表面積比（cm）

計算結果は実験結果をよく表すことが出来ており，コンクリートの拘束応力を評価するに当たって，有効ヤング係数法の適用性が確認できたが，F20 では若干のずれが生じている。ここで，式(2)のクリープひずみ予測式は，FA の影響を考慮することが出来ないため，すべての調合で W/C が 55%である N のクリープひずみを用いて計算した。強度が同程度の場合，クリープひずみに及ぼす FA の影響は小さい[1]と考えられるが，F20 の場合，応力の計算値が実験値よりも若干大きいことからクリープひずみも他の調合より大きくなっていることが考えられる。

ひび割れ発生時の拘束応力は，1.13～1.52N/mm² であり，材齢 7 日の静的引張強度の 0.46～0.61 となる。しかしながら，ひび割れ発生時の引張強度と比べると強度比は 0.66～0.88 となる。これは，乾燥開始直後のコンクリートに生じる引張応力による引張強度の低下によるものである。乾燥は表面部分から生じるため，内部とは乾燥の程度が異なり，収縮応力の勾配が生じ表面に引張応力が発生することになる。ひび割れ発生時の応力強度比は既往の実験によって検討されており，ひび割れ発生までの期間が長くなるほど応力強度比が大きくなることや供試体の形状の違いなどの様々な要因により異なるが，平均的には引張強度の 70%程度の小さい応力でひび割れが発生する[7]。本実験結果もほぼ同程度の結果となった。

図-2 の結果から時間を消去した「拘束応力ー拘束引張ひずみ」曲線を**図-3** に示す。ここで，自由収縮ひずみと拘束供試体ひずみの差を拘束引張ひずみとしている。また，静的引張強度試験における「応力ーひずみ」曲線も示している。拘束収縮ひび割れ試験は，非常にゆっくり

とした載荷速度で引張った場合の引張強度試験とみなすことができるが，ひび割れ発生時の拘束応力は静的引張強度よりも小さく，引張ひずみはクリープの影響を受けて大きくなると考えられる[8]。ひび割れ発生時の応力は静的引張強度よりも小さい値となっているが，拘束引張ひずみに関しては，N および F10 の場合，静的引張試験の最大ひずみと同程度のひずみでひび割れが発生した。F20 の場合，ひび割れ発生時の応力が最も小さいが，伸び能力が限界に達したためにひび割れが生じたものと考えられる。FA を 20%置換することによって，拘束応力が若干緩和され，ひび割れの発生が遅くなった。

3. モルタル供試体による実験

3.1 実験概要

コンクリートによる乾燥収縮ひび割れ試験は，サイズが大きく試験装置の数に制限があり，一度に多くの供試体を試験することが難しいが，一度に多くの供試体を簡便に作製できるモルタルによってひび割れ抵抗性能を評価できれば, FA の影響に関してもデータの蓄積が容易になる。そこで，モルタルの収縮ひび割れ試験方法を検討し，FA モルタルの収縮ひび割れ実験を行った。試験方法は，供試体作製の簡便さを優先して，内部拘束型[9]の一軸拘束ひび割れ試験とし，型枠は JIS R 5201 に規定される 40×40×160mm を使用することにした。

3.2 予備実験

(1) 実験方法

図-4 にひび割れ供試体を示す。拘束鋼材はみがき丸鋼 φ13mm とし，中央の試験区間の長さは 40mm とした。定着区間はみがき丸鋼にネジ加工して，モルタルとの付着を確保するようにした。鋼材の位置を固定するための治具を型枠内に固定したため供試体のモルタル部分の長さは 154mm である。内部拘束型のひび割れ試験方法におけるモルタルに生じる拘束応力は，鋼材のひずみを測定すれば式(3)より算出できる。これは，拘束鋼材とモルタルのひずみが一致していることが前提条件となっている。

$$\sigma_m = -(E_S \times \varepsilon_S \times A_S) \ /A_m \qquad (3)$$

ここに，σ_m：モルタルの拘束応力（N/mm^2），E_S：鋼材のヤング係数（N/mm^2），ε_S：鋼材のひずみ，A_S：鋼材の断面積（mm^2），A_m：モルタルの断面積（mm^2）

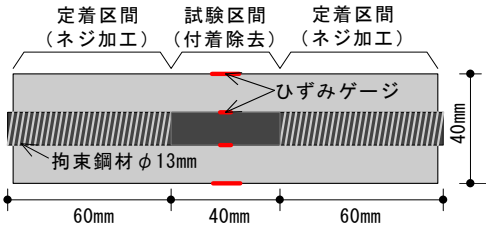

図-4 拘束供試体

既報[10]において，試験区間が 60mm 以上であると鋼材との付着が不充分となり，両者のひずみが一致しないことを確認している。そのため，試験区間の長さは 40mm としたが，予備実験で両者のひずみの測定を行い確認することとした。鋼材のひずみの測定にはひずみゲージ（ゲージ長：2mm）を使用し，鋼材中央部の 2 箇所に貼り付けた。モルタルのひずみの測定はポリエステルゲージ（ゲージ長：20mm）を使用し，打設面と底面を除く面の中央部の 2 箇所に貼り付けた。試験区間の処理として，熱収縮チューブを巻いた上にグリスを塗りモルタルとの付着を除去するようにした。また，自由収縮ひずみの測定は，埋込みゲージ（ゲージ長：50mm）を用いた。

モルタルの調合は水セメント比を 60%，細骨材容積比を 55%とし，使用材料はコンクリートと同じである。モルタルの練混ぜには容量 5 リットルのモルタルミキサを使用し，練混ぜ時間は 3 分とした。ひび割れ供試体および自由収縮ひずみ測定用供試体をそれぞれ 3 体とし，すべての供試体は材齢 1 日で脱型し，材齢 7 日まで標準水中養生（温度 20℃）を行い，恒温恒湿室内（温度 20±1℃，60±5%R.H.）で乾燥を開始した。

(2) 実験結果および考察

各供試体のひずみの測定結果を**図-5** に示す。乾燥開始後 7~10 日程度でひび割れが発生した。ひび割れ発生後，モルタルのひずみは拘束応力が開放されるため自由収縮ひずみに近づいていくが，ゲージの位置にひび割れが発生した供試体はその後のひずみの測定が出来ていない。ひび割れが発生するまでのモルタルと拘束鋼材のひずみは概ね一致していることから，モルタルと拘束鋼材の付

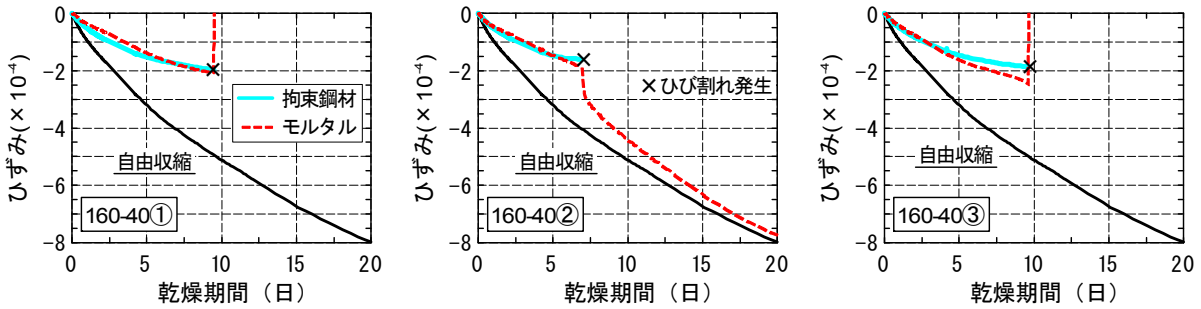

図-5 ひずみの経時変化（予備実験）

着は充分に確保されていると判断できる。

3.3 本実験

(1) 実験方法

モルタルの調合を**表-5** に示す。**表-2** に示すコンクリートの調合から粗骨材を取り除いたものであるが，混和剤は使用していない。ひび割れ供試体は，予備実験に示したものと同様であるが，モルタルのひずみの測定は行っていない。乾燥収縮ひずみの測定は，40×40×160mm の供試体を用い JIS A 1129-3 に準拠して行った。供試体の作製方法は予備実験と同様である。モルタルの流動性を評価する指標として，フロー値およびミニスランプ値を測定した。なお，フロー値はフローコーンを用いた 15 打フロー値，ミニスランプ値は JIS A 1171 に定められたスランプコーンを用いて行った。

圧縮強度試験は，φ50×100mm の供試体を用いて材齢 7 および 28 日で行い，コンプレッソメータによりひずみを測定し，圧縮強度とヤング係数を求めた。また，割裂引張強度は φ50×100mm の供試体を用い，コンクリートの試験方法である JIS A 1113 を参考にして材齢 7 および 28 日で行った。また，Nm のみであるが，1×1×11inch の供試体を用いてパンタグラフ式チャック[11]による直接引張強度試験を行った。これは，供試体の端部を挟んで引張るもので，材齢 7 日および材齢 7 日から乾燥させた供試体は乾燥期間 1, 3, 7, 14 日で試験を行った。

(2) 実験結果および考察

フレッシュ性状の試験結果を**表-6**，強度試験結果を**表-7** に示す。15 打フロー値およびミニスランプともに，すべての調合でほぼ同程度の結果が得られた。圧縮強度も材齢7および28日ですべての調合に差はなくほぼ同程度である。また，ヤング係数および割裂引張強度も圧縮強度と同様に同程度であるが，材齢 28 日の割裂引張強度は F20m が若干小さい結果となった。

乾燥収縮ひずみと脱水量の関係を**図-6** に示す。コンクリートの試験結果と同様に，FA を置換率が大きくなるほど脱水量が大きくなるが，収縮ひずみはほぼ同程度であり FA 混入の影響はあまり見られない。

拘束鋼材のひずみおよび自由収縮ひずみの経時変化を**図-7** に示す。乾燥開始後にひび割れが発生するまでの期間（以下，ひび割れ発生期間）は，各調合と約 5.5 日で同程度であり，F20m の残りの 2 体と F10m の 1 体にもすぐにひび割れが発生した。それに対し，Nm の 2 体のひび割れ発生期間は 16.5，32.8 日，F10m の 1 体は 33.3 日と大幅に遅れる結果になった。平均のひび割れ発生期間は F20m が最も早い結果となったが，割裂引張強度は F20m が最も小さく，供試体間のばらつきもあり，明確な結論は得ることが出来ていない。

ひび割れ発生期間と拘束応力の関係を**図-8** に示す。拘束応力は，予備実験の結果から拘束鋼材とモルタルの間

表-5 モルタルの調合

調合	FA/B (%)	W/B (%)	W/C (%)	単位量(kg/m³)			
				C	FA	W	S
Nm	0	55.0	55.0	535	0	294	1369
F10m	10	51.2	56.8	507	56	288	1344
F20m	20	47.3	59.1	482	121	285	1295

表-6 フレッシュ性状試験結果

調合	15 打フロー値 (mm)	ミニスランプ (mm)	空気量 (%)
Nm	203	93	2.5
F10m	202	91	2.6
F20m	199	90	1.7

表-7 強度試験結果

調合	圧縮強度 (N/mm²)		ヤング係数 (kN/mm²)		割裂引張強度 (N/mm²)	
	7 日	28 日	7 日	28 日	7 日	28 日
Nm	24.9	40.6	19.5	23.4	2.97	3.36
F10m	25.3	37.9	18.8	22.4	2.89	3.22
F20m	25.5	39.8	18.5	22.7	2.85	3.12

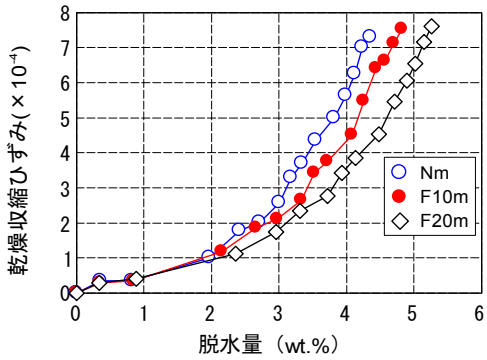

図-6 乾燥収縮ひずみと脱水量の関係

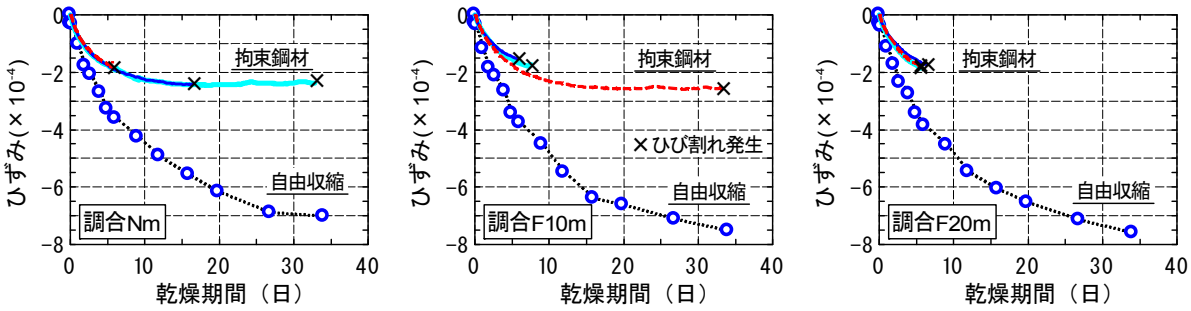

図-7 ひずみの経時変化（本実験）

では力の釣合いと変形の適合条件が成り立つとして，鋼材のヤング係数を 206kN/mm^2 として式(3)より算出した。図には直接引張強度試験結果も示している。材齢 7 日の直接引張強度は割裂引張強度と同程度であり，乾燥後 1 日では強度は一旦低下するが，3 日で回復し，7 日では増進している。コンクリート供試体の場合は，乾燥後に強度が大きく低下し，すぐには回復していないが，モルタル供試体はコンクリート供試体に比べると断面が小さいため，乾燥の程度の違いによる収縮応力の勾配が小さく，表面の引張応力が小さくなることが影響している。

ひび割れ発生時の拘束応力は，ひび割れ発生期間が 5.5～7.5 日では 2.8～3.4N/mm^2 程度であり，乾燥期間が 7 日の直接引張強度よりも若干小さい。ひび割れ発生期間が長くなるほど拘束応力も大きくなり，乾燥期間が 15 日以上では拘束応力は 4N/mm^2 を超え，コンクリート供試体の場合に比べてかなり大きな値になる。これは，コンクリート供試体とモルタル供試体では，供試体の大きさが異なるため乾燥を受ける場合の引張強度に大きな差が生じるためであり，ひび割れ発生時の拘束応力が大きく異なることになる。今後，更なるデータの蓄積を行い，コンクリートとモルタルのひび割れ特性の違いを明らかにしていく予定である。

4. まとめ

本研究で，FA がモルタル・コンクリートの乾燥収縮ひび割れに及ぼす影響について検討し，以下の知見を得た。

(1) コンクリート供試体による拘束ひび割れ試験の結果，FA を 20%置換することで，拘束応力が緩和され，ひび割れが発生するまでの期間が長くなる。

(2) モルタル供試体による拘束ひび割れ試験の結果はコンクリートの場合と異なり，ひび割れが発生するまでの期間は，FA コンクリートのほうが短くなったが，割裂引張強度の違いや供試体間の試験結果のばらつきがあり，FA の影響は明確には分からなかった。また，ひび割れ発生時の拘束応力はコンクリートと比べて大きい。

(3) モルタルとコンクリートのひび割れ特性に関して同様の結果を得ることが出来なかったが，FA がひび割れ特性に及ぼす影響はあまり大きくない。

謝辞

本研究の一部は，大分大学 VBL プロジェクト研究 A「低酸素社会の実現を目指した汎用型長寿命コンクリートの製造技術の確立」の助成を受けて実施した。

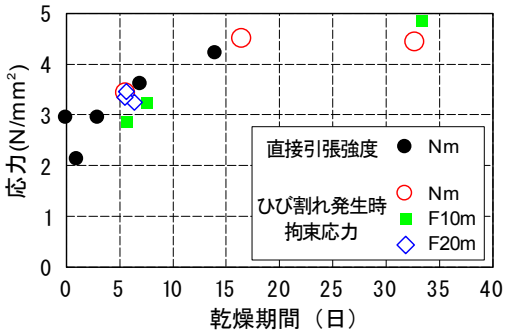

図-8 ひび割れ発生期間と拘束応力の関係

参考文献

1) 濵永康仁，成田健志，大谷俊浩ほか：高品質フライアッシュ（CfFA）混入コンクリートの収縮ひび割れ特性に関する研究（その 1，その 2，その 3），日本建築学会九州支部，第 50 号・1，pp. 73-84, 2011

2) 濵永康仁，佐藤嘉昭，上田賢司，清原千鶴：ひずみ制御機能を備えた収縮ひび割れ試験装置の開発，コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp. 519-524, 2004

3) 李相培，佐藤嘉昭，岡田秀敏，清原千鶴：焼成工程を備えた風力処理微粉砕システムによる石炭灰の改質，コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp. 183-188, 2007

4) 伊藤七恵，佐藤嘉昭，上田賢司，大谷俊浩：高品質フライアッシュを用いたコンクリートの調合設計に関する研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp. 167-172, 2011

5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説，2006

6) 小池晶子ほか：収縮低減剤および収縮低減型高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの収縮ひび割れ低減効果（その 1　実験概要およびコンクリートの基礎力学的性質），日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 893-894, 2010

7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ－メカニズムと対策技術の現状－，2003

8) 佐藤嘉昭ほか：コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ発生条件に関する研究，日本建築学会構造系論文集 Vol.73, No.634, pp. 2051-2060, 2008

9) 日本コンクリート工学協会：混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善委員会報告書，pp. 209-211, 2010

10) 蒋海燕ほか：モルタルの収縮ひび割れ試験方法に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp. 733-734, 2012

11) 郡山和彦，佐藤嘉昭，永松静也：モルタルの引張りクリープに関する研究（その 3），日本建築学会研究報告九州支部 構造系（30），pp. 41-44, 1988