論文　コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関するフライアッシュ混和の影響

石川　嘉崇[*1]・安田　幸弘[*2]

要旨：一般に，フライアッシュは，自己収縮，乾燥収縮低減効果を有するといわれている。また，フライアッシュを内割置換したコンクリートは，普通コンクリートと同程度以上の収縮ひび割れ抵抗性を有していると報告されている。本研究ではフライアッシュを用いたコンクリートを対象に，収縮ひび割れ抵抗性に影響を与えるフライアッシュ置換率および置換方法の影響等について検討した。試験結果によれば，フライアッシュの置換率を上げると自己収縮ひずみおよび自由収縮ひずみは小さくなり，拘束ひび割れ試験体におけるフライアッシュの混和によるひび割れ抑制効果は，フライアッシュの置換率 20%までは認められた。

キーワード：収縮ひび割れ，フライアッシュ，自己収縮，拘束鉄筋，高炉スラグ微粉末

1．はじめに

既往の研究によれば，一般にフライアッシュは，自己収縮，乾燥収縮低減効果を有するとされている。減水効果の大きい良質のフライアッシュほど乾燥収縮が小さくなることから，フライアッシュ混和による単位水量の低減が乾燥収縮低減効果一つの要因と考えられている[1)]。

文献[2)]では，フライアッシュコンクリートの乾燥収縮に対するひび割れ抵抗性について一軸拘束試験により検討を行っている。その結果，JIS 規格に基づき試験を行った場合には，フライアッシュコンクリートは，普通コンクリートに比べてひび割れ抵抗性は小さいが，実構造物のように拘束率の低い場合や十分に養生を行った場合には，フライアッシュコンクリートのひび割れ抵抗性は普通コンクリートと同等になることが確認されている。また，土木学会フライアッシュ有効活用小委員会では，フライアッシュコンリートのひび割れ抵抗性の改善効果を評価するために，種々の収縮ひび割れ試験を実施している。それらの試験結果によれば，フライアッシュコンクリートの自己収縮および乾燥収縮は，普通コンクリートと同等，またはそれ以上であることが確認されている[3)]。

以上のように，フライアッシュは，一般には，自己収縮，乾燥収縮低減効果を有するとされるが，フライアッシュを使用しても収縮量は変化しないという報告もあり，フライアッシュによる収縮低減メカニズムも十分には解明されてはいないのが現状である。

そこで，本論文ではフライアッシュを用いたコンクリートを対象に，収縮ひび割れ抵抗性に与えるフライアッシュ置換率および置換方法の影響について，文献[1)]で提案されている拘束試験体における拘束ひび割れ試験を主体として，自由収縮試験，自己収縮試験を実施して検討した。

2．実験計画

2.1 実験要因および水準

表－１に実験要因と水準を示す。コンクリートの水準としては 3 水準とした。普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリート(以下，N コンクリート)，フライアッシュを混和材として用いたコンクリート（以下，FA コンクリート），および高炉セメントにフライアッシュを混和材として用いたコンクリート（以下，BBF コンクリート）とした。**表－１**に示すとおり，フライアッシュの置換率については，FA コンクリートで，内割置換（10%，20%，30%）および外割置換（10%），BBF コンクリートで，内割置換（20%）とした。（FA コンクリートの外割置換の 10%については，細骨材の体積の 10%程度として 70kg/m^3 とした。）

2.2 実験に用いた材料と調（配）合

本実験で使用した材料を，**表－２**にまとめて示す。またフライアッシュの品質に関しては，**表－３**に示すとおり JIS Ⅱ種品を使用した。高炉スラグ微粉末は，高炉スラグ微粉末 4000（JIS A 6006）の規定値を満足し，密度 3.16g/cm^3，比表面積 4170 ㎠/g，フロー値比 99 のものを使用した。

実験要因と水準に基づき，**表－４**に示す調（配）合計画とした。本実験では，材料の基本的な特性を把握するため，強度発現が異なることを前提として，水粉体比を一定とした。また，フライアッシュ置換による単位水量

表－１　実験要因と水準

実験要因	水準
コンクリート種類	3 水準（N コンクリート，FA コンクリート，BBF コンクリート）
フライアッシュ置換率	FA コンクリート（内割：10，20，30%），BBF コンクリート（内割：20%）

*1 電源開発　茅ヶ崎研究所　上席研究員　博士（工学）　(正会員)
*2 開発設計コンサルタント　技術センター　所長代理

低減効果については考慮せず，収縮特性に影響を与える単位水量を一定とし，高性能 AE 減水剤にてスランプを調整した。FA コンクリートは JIS A 6201Ⅱ種品を用いて，置換率および置換方法を変化させた。BBF コンクリートは高炉セメントＢ種に相当するよう普通ポルトランドセメントの 40%を高炉スラグ微粉末で置換し，かつフライアッシュを内割で 20%置換したものを使用した。

表－２　本試験で使用した材料一覧表

普通ポルトランドセメント（OPC）：密度 3.16g/cm^3
ISⅡ種灰（FA）：Ⅰ火力発電所産（密度 2.24 g/cm^3）
高炉スラグ微粉末（BB）：密度 2.89 g/cm^3
細骨材(Ｓ)硬質砂岩砕砂：密度 2.63g/cm^3，吸水率 1.29%
粗骨材（G）硬質砂岩砕石： 粗目(G1)（表乾密度 2.66g/cm^3，吸水率 0.64%） 細目(G2)（表乾密度 2.65g/cm^3，吸水率 1.03%）
水(W)：上水道水
混和剤：ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

表－３　フライアッシュの品質

品質		JIS A 6201 による規定値	試験値
二酸化けい素	%	45.0 以上	61.4
湿分	%	1.0 以下	0.1
強熱減量(1)	%	5.0 以下	0.7
密度	g/cm^3	1.95 以上	2.24
粉末度	45μふるい残分 %	40 以下	3
	比表面積 ㎠/g	2500 以上	4130
フロー値比	%	95 以上	112
活性度指数 %	材齢 28 日	80 以上	89
	材齢 91 日	90 以上	107
MB 吸着量（電発法）mg/g		―	0.55

表－５　試験項目と試験内容

試験項目	試験内容
拘束ひび割れ試験	実ひずみ（時系列），収縮拘束応力（時系列），ひび割れ材齢，
自由収縮試験	自由収縮ひずみ（時系列）
自己収縮試験	自己収縮ひずみ（時系列）
質量変化率	質量変化率（時系列）乾燥期間 7，28，56，91 日で測定
強度試験	圧縮強度，割裂引張強度，ヤング係数：乾燥開始時，および材齢 7，28 日
凝結試験	始発時間，凝結時間：ひずみおよび強度特性のゼロ点となる

2.2 試験項目および試験

試験項目としては，**表－５**に示すとおり，拘束ひび割れ試験，自由収縮試験，自己収縮試験，質量変化率試験，強度試験，凝結試験を実施した。収縮ひずみについて実施した 3 試験について，試験体，養生，ひずみ測定について，以下に示す。

(1) 拘束ひび割れ試験

文献[1)]で提案されている拘束ひび割れ試験体の概要を**図－１**に示す。拘束ひび割れ試験に用いた型枠の大きさは，100mm×100mm×1100mm とした。内部拘束体としての鉄筋は，丸鋼φ32mm，全長 1200mm で鉄筋の両端 450mm に M33 相当のねじ切り処理を施したものである。試験体中央部の 300 ㎜は，鉄筋の付着が除去されており，鉄筋の中央にひずみゲージが貼付されている。

拘束ひび割れ試験体は，材齢 7 日まで湿潤養生（型枠存置）状態で養生し，脱型した。脱型後，乾燥面は 2 面とし，試験体材軸方向の 4 面のうち相対する 2 面を開放して残り 2 面をアルミテープで封緘した。

養生における温度・湿度条件は，温度 20℃，相対湿度 60%で実施した。

拘束試験体のひずみ計測は，コンクリート打設前から

表－４　調（配）合計画

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位質量（上段：kg/m^3、下段：l/m^3）								高性能AE減水剤（対結合材質量比%）	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)
			W	OPC	BB	FA	FA	S	G1	G2			
N	50	46.7	175	350	-	-	-	822	474	473	0.75	19.5	4.1
			175	111	-	-	-	313	178	178			
FA10	50	46.7	175	315	-	35	-	817	471	470	0.50	19.5	4.7
			175	100	-	16	-	311	177	177			
FA20	50	46.7	175	280	-	70	-	811	468	467	0.50	19.5	5.0
			175	89	-	31	-	308	176	176			
FA30	50	46.7	175	245	-	105	-	806	465	463	0.50	20.0	4.8
			175	78	-	47	-	306	175	175			
BBF20	50	46.7	175	168	112	70	-	807	466	464	0.50	19.5	4.8
			175	53	39	31	-	307	175	175			
FA10(外)	50	46.7	175	350	-	-	70	740	474	473	0.50	20.5	4.7
			175	111	-	-	31	281	178	178			

開始し，計測間隔は 1 時間とした。また，コンクリートの打設前後，脱型前後においてもひずみ計測を実施した。

ひずみ計測終了時期は，拘束試験体にひび割れが発生してから 2 週以上とした。得られた鉄筋の平均ひずみよりコンクリートの収縮応力を算出した。算出式を以下に示す。

$\sigma c = (Es \times \varepsilon s \times As)/Ac$

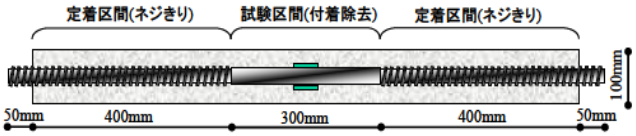
ここに，σc:コンクリートの拘束収縮応力（N/mm^2）

Es:拘束鉄筋の弾性係数（N/mm^2）

εs:拘束鉄筋のひずみ

As:拘束鉄筋の中央部断面積（mm^2）

Ac:コンクリートの純断面積（mm^2）



図－１　拘束ひび割れ試験体概要

(2) 自由収縮試験

自由収縮試験体の大きさは，100mm×100mm×400mm とした。養生は，拘束ひび割れ試験体と同様とした。乾燥面については，拘束ひび割れ試験体と同様に 2 面乾燥とした。自由収縮ひずみの測定は，コンクリート断面中央部に設置した埋込みひずみゲージにより測定し，拘束ひび割れ試験体のひび割れ後も継続し 91 日間とした。

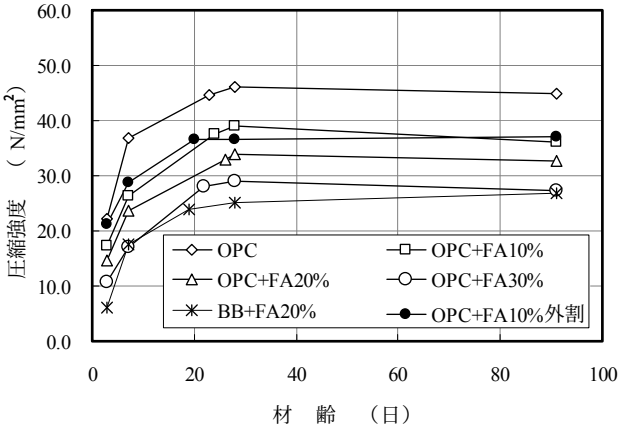
(3) 自己収縮試験

自己収縮試験体の大きさは，100mm×100mm×400mm とした。養生は，材齢 7 日まで拘束ひび割れ試験体と同様とした。室内の温度・湿度条件は拘束試験体と同様であるが，脱枠後は 4 面全面を，アルミテープで封緘して養生した。自己収縮ひずみの測定は，コンクリート断面中央部に設置した埋込みひずみゲージにより測定し，拘束ひび割れ試験体のひび割れ後も継続し 91 日間とした。

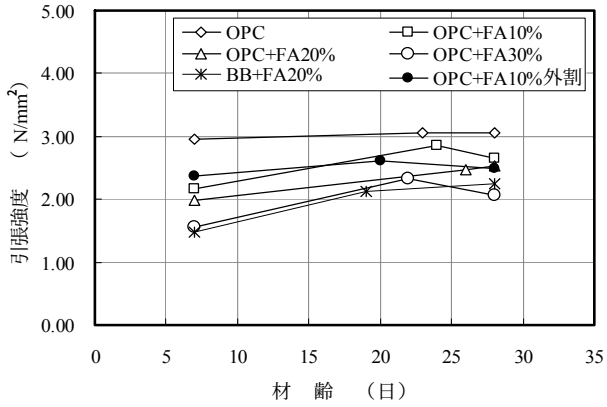
3．実験結果および考察

3.1 強度試験結果

図－２，３に拘束ひび割れ試験体と同一の養生を行った供試体による強度試験結果を示す。これらの図より，圧縮強度，割裂引張強度ともに，FA コンクリートはフライアッシュ置換率が大きくなるに伴い実質水セメント比が N コンクリートに比べ大きくなるため，フライアッシュ置換率の増大に伴い低下傾向を示す。ただし，FA コンクリートのうちフライアッシュを外割置換した場合は，水セメント比および養生条件が N コンクリートと同一にもかかわらず強度増進は認められなかった。最も強度発現が小さかったのは，高炉セメント B 種を用いた BBF コンクリートであった。なお，圧縮強度は各コンクリートとも，材齢 7 日以降，気中養生したためか，材齢 28 日以降の強度増進はほとんど見られなかった。



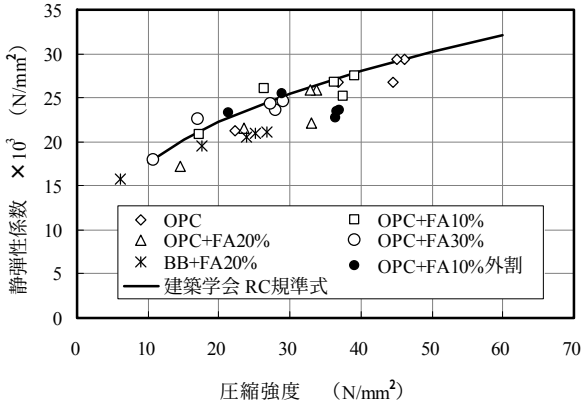
図－２　圧縮強度試験結果



図－３　引張強度試験結果

3.2 静弾性係数試験結果

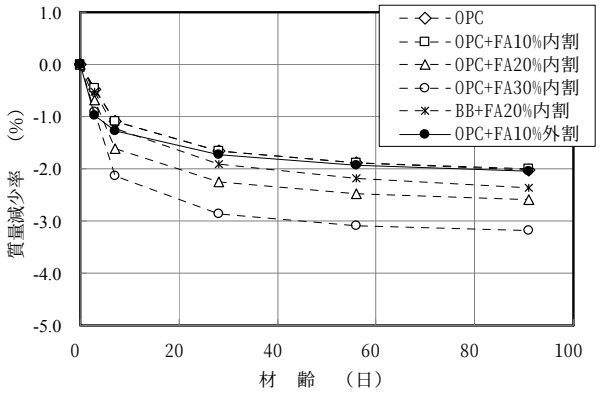
圧縮強度と静弾性係数の関係は，建築学会 RC 基準式より下方に位置し，材齢 7 日以降気中養生したコンクリートの静弾性係数は，標準養生した場合に比べ小さくなる傾向にある。



図－４　静弾性係数と圧縮強度の関係

3.3 質量変化率試験結果

単位水量および単位粉体量一定の条件下で実施したフライアッシュを用いたシリーズの質量変化試験結果を**図－5**に示す。**図－5**から，フライアッシュ内割置換率が 10%および外割置換率 10%では普通セメント単味と同程度の変化量であるが，内割置換率が 10%を超えると，置換率の増大に伴い変化量は大きくなる傾向にある。また，セメントの種類（フライアッシュ置換率：20%）で比べた場合，高炉セメントＢ種の方が変化率は若干小さい。



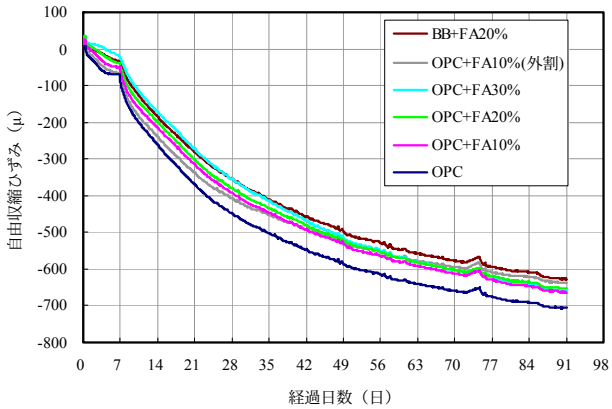
図－5 質量変化率試験結果

3.4 自由収縮試験結果

各コンクリートの自由収縮ひずみを**図－6**に示す。各コンクリートとも打込み後 7 日目より拘束ひび割れ試験体と同様の養生条件である。自由収縮ひずみは，材齢 56 日程度までは急激に増加し，それ以降は緩やかに進行している。自由収縮ひずみは，N コンクリートとフライアッシュを内割使用した FA コンクリートを比較した場合，フライアッシュを置換したコンクリートでは自由収縮ひずみは N コンクリートに比較して小さく，フライアッシュ置換率によるひずみ量の差はあまりみられない。フライアッシュ置換による自由収縮ひずみ抑制効果が認められた。また，BBF コンクリートは最も自由収縮ひずみ量が小さく，経過日数 91 日で約 100μ程度 N コンクリートと比べて小さくなっている。また最も自由収縮ひずみ量の小さい順は，BBF コンクリート，FA コンクリート（外割），FA コンクリート（内割），N コンクリートの順となっている。

3.5 自己収縮試験結果

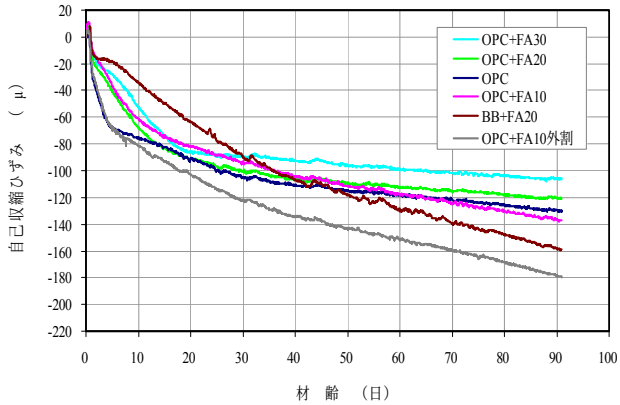
各コンクリートの自己収縮ひずみを**図－7**に示す。各コンクリートとも打込み後 1 日目より自己収縮ひずみが発生し，材齢 20 日程度までは急激に増加し，それ以降は緩やかに進行している。自己収縮ひずみは，N コンクリートとフライアッシュを内割使用した FA コンクリー



図－6 自由収縮試験結果

トを比較した場合，フライアッシュ置換率が高いコンクリート（20%，30%）では自己収縮ひずみは小さく，フライアッシュ置換率 10%ではほとんど，N コンクリートと同等となっている。フライアッシュ置換による自己収縮ひずみ抑制効果が認められた。

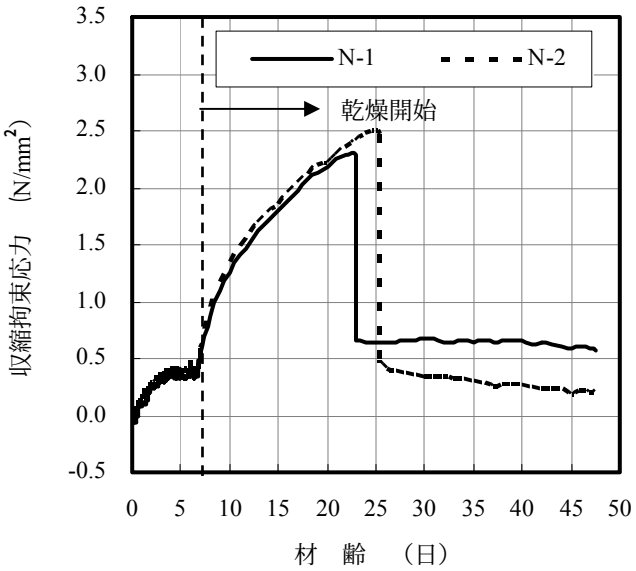
また，BBF コンクリートは，N コンクリートと比べ自己収縮ひずみは増大し，自己収縮抑制効果は認められなかった。なお，FA コンクリートのうちフライアッシュを外割置換したコンクリートの自己収縮ひずみが最も大きい結果となった。



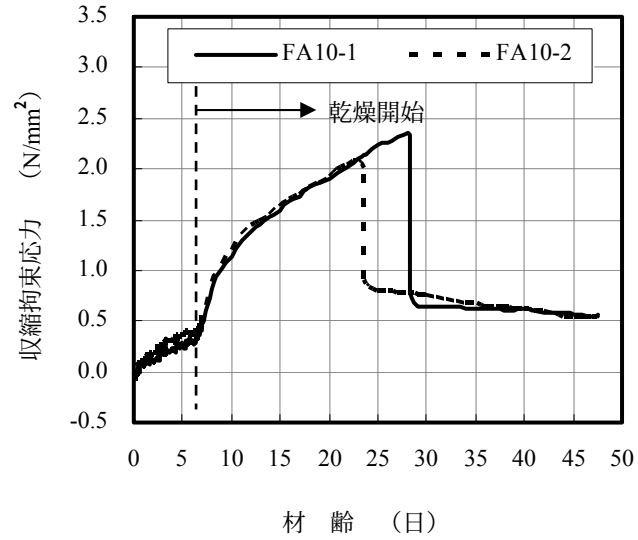
図－7 自己収縮試験結果

3.6 拘束ひび割れ試験結果

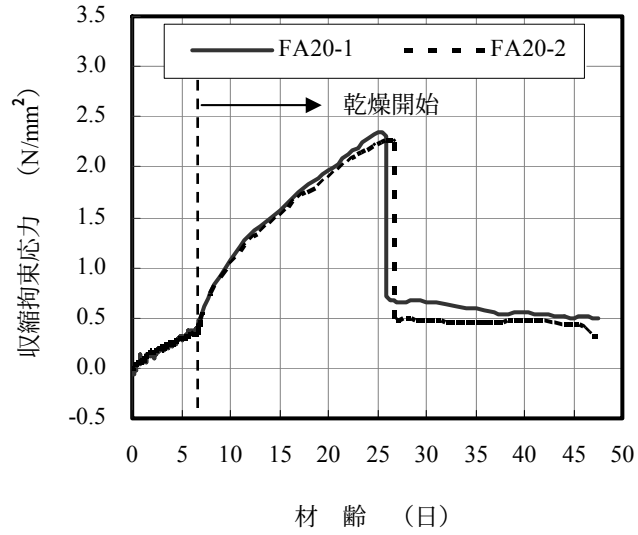
図－8～図－13に，各コンクリートの拘束収縮応力の経時変化を示している。2 本のラインはそれぞれのケースで 2 体の試験体の継時変化を示している。乾燥開始後は，急激に拘束収縮応力が増大する。乾燥開始後にひずみ・応力が急変している点はひび割れが発生したことを示している。各コンクリートとも，計測開始後 1 日以降より収縮ひずみは増大し，それに伴いコンクリートの収縮応力が増大している。なお，材齢 7 日までの封緘養生中の拘束収縮応力の増大は自己収縮の影響による。



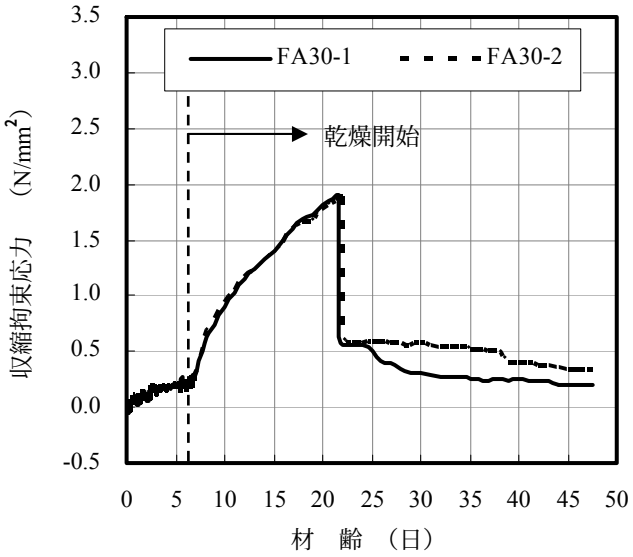
図－８　拘束ひび割れ試験結果



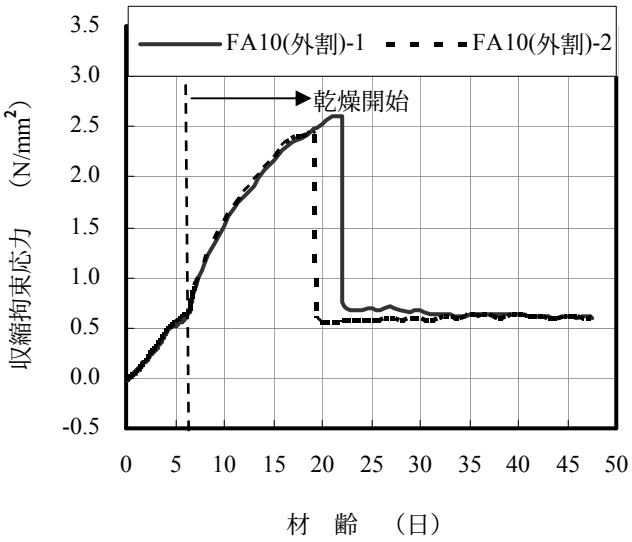
図－９　拘束ひび割れ試験結果



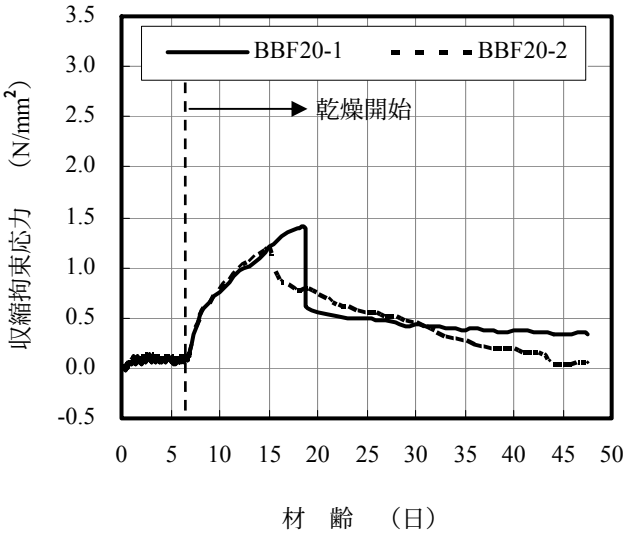
図－１０　拘束ひび割れ試験結果



図－１１　拘束ひび割れ試験結果



図－１２　拘束ひび割れ試験結果

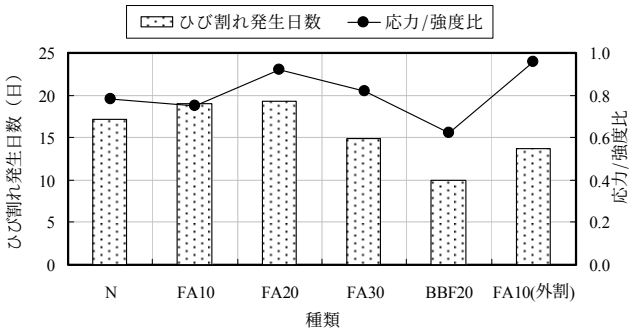


図－１３　拘束ひび割れ試験結果

表－６　拘束ひび割れ試験の結果一覧

種類	ひび割れ発生日数(乾燥開始後)	ひび割れ発生応力 (N/mm^2)	ひび割れ発生時の引張強度 (N/mm^2)	応力/強度比
N	15.9	2.30	3.06	0.75
	18.5	2.46		0.80
	17.2	**2.38**	**-**	**0.78**
FA10	21.4	2.33	2.85	0.82
	16.6	1.95		0.68
	19.0	**2.14**	**-**	**0.75**
FA20	18.9	2.30	2.47	0.93
	19.7	2.25		0.91
	19.3	**2.28**	**-**	**0.92**
FA30	14.7	1.90	2.33	0.82
	15.0	1.89		0.81
	14.9	**1.90**	**-**	**0.82**
BBF20	11.8	1.40	2.12	0.66
	8.1	1.20		0.57
	10.0	**1.30**	**-**	**0.62**
FA10 外割	15.1	2.55	2.61	0.98
	12.3	2.42		0.93
	13.7	**2.49**	**-**	**0.96**

注）太字は 2 体の試験体の平均値を示す。



図－１４　ひび割れ発生日数とひび割れ発生応力・ひび割れ発生時引張強度との関係

拘束ひび割れ試験結果をとりまとめて**表－６**に示す。各コンクリートのひび割れ発生日数とひび割れ発生応力・ひび割れ発生時引張強度との関係について，**図－14**に示す。ひび割れ発生日数は，ひび割れ発生時の引張り強度が小さいものは小さくなる。ひび割れ発生日数を指標として，ひび割れ抵抗性を評価すると，N コンクリートとフライアッシュを内割使用した FA コンクリートを比較した場合，フライアッシュの置換率 20%まではひび割れ発生日数が，N コンクリートと同程度か若干遅く，フライアッシュ置換率 30%では若干早くなっており，フライアッシュ置換率 20%までは収縮ひび割れの抑制効果が認められたと考えられる。

また，フライアッシュを外割置換した FA コンクリートは，N コンクリートと比べひび割れ発生日数が若干早く，今回の実験では収縮ひび割れの抑制効果は認められなかった。フライアッシュを外割置換した FA コンクリートの強度がNコンクリートと比較して低くなっていることが影響しているものと思われる。なお，高炉セメント B 種にフライアッシュを 20%置換した BBF コンクリートのひび割れ発生日数が最も小さく，N コンクリートより 7 日程度早い結果であった。この原因も強度の影響が大きいと推察される。今後収縮試験全体の試験結果から解析的な検討を行いたいと考えている。

4．まとめ

本実験では，水粉体比が一定で強度発現性状はそれぞれ異なるので，今後詳細な検討が必要ではあるが，本実験結果をまとめると以下のとおりである。

（１）自己収縮ひずみは，N コンクリートと FA コンクリート（内割使用）を比較した場合，フライアッシュ置換率が高いコンクリートでは自己収縮ひずみは小さく，フライアッシュ置換による自己収縮ひずみ抑制効果が認められた。

（２）自由収縮ひずみは，N コンクリートと FA コンクリート（内割使用）を比較した場合，FA コンクリートでは自由収縮ひずみは N コンクリートに比較して小さく，フライアッシュ置換率によるひずみ量の差はあまりなかった。

（３）FA コンクリート（内割使用）は，フライアッシュ置換率 20%までは収縮ひび割れの抑制効果が認められた。本実験結果からは，フライアッシュを外割置換した FA コンクリートは, N コンクリートと比べひび割れ発生日数が若干早かった。同様に，高炉セメント B 種にフライアッシュを 20%置換した BBF コンクリートについても，ひび割れ発生日数が早かった。

参考文献

1) 社）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委員会報告書， 2010.9
2) 中川隆夫・大野義照・徐泰錫・松田成貴：フライアッシュを用いたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，483-488，2004
3) 社）土木学会：循環型社社会に適合したフライアッシュの最新技術-利用拡大に向けた設計施工指針案-，コンクリートライブラリー132，pp.246-253，2009.12