論文　鉄筋埋設拘束試験によるフライアッシュコンクリートの収縮ひび割れ特性に関する研究

大谷　俊浩*1・蒋　海燕*2・伊藤　七恵*3・佐藤　嘉昭*4

要旨：本研究では，フライアッシュを混入したコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を把握することを目的に，単位水量を一定とし，フライアッシュ無混入コンクリートの材齢 28 日強度とほぼ同一にした調合条件にて鉄筋埋設ひび割れ試験および圧縮クリープ試験を実施した。その結果，既報のセメントの内割りで置換した条件で認められたフライアッシュ混入による明確なひび割れの遅延効果は認められず，逆に混入率が高いほど，無混入に比べてひび割れの発生が早くなることがわかった。このことから，フライアッシュによる収縮ひび割れ抑制効果は，フライアッシュによる減水効果が主であることが推察された。

キーワード：収縮ひび割れ，フライアッシュ，単位水量，乾燥収縮，クリープ，鉄筋埋設

1. はじめに

高炉スラグやフライアッシュなどの混和材は，今後も積極的に利用していく必要があるものであるが，それらを混入したコンクリートの収縮ひび割れ特性は充分に明らかになっているとは言えない。そこで，筆者らは，既報[1)]において埋設鉄筋の拘束による収縮ひび割れ試験方法[2)]（以下，鉄筋埋設拘束試験）による実験を行った。その際の条件は，高炉スラグ微粉末およびフライアッシュをセメント置換したもの（内割混入）であったが，高炉スラグ微粉末を混入することでひび割れ発生の促進とフライアッシュ混入によるその遅延が認められた。しかしながら，実際の利用を想定した場合，コンクリートの品質は管理材齢の強度で管理されるため，基準コンクリートの強度と同一となる調合条件で比較する必要があると考えられる。

そこで，本研究では，基準コンクリートと材齢 28 日強度を同一とした調合条件で各種強度試験，鉄筋埋設拘束試験によるひび割れ試験および圧縮クリープ試験を実施し，フライアッシュ混入コンクリートの収縮ひび割れ性状を明らかにすることにした。

2. 実験

2.1　実験概要

表-1 に実験概要を示す。コンクリートの力学的性状を把握するために，圧縮強度試験および割裂引張強度試験を実施した。また，圧縮クリープ試験では，載荷応力ならびにクリープひずみを求めるため同一形状の供試体を用いて圧縮強度試験，乾燥収縮試験および自己収縮試験を実施した。さらに，収縮ひび割れ試験では，鉄筋埋設ひび割れ試験用供試体と同一養生条件の供試体を用いて，乾燥収縮および自己収縮試験を実施した。

2.2　鉄筋埋設拘束試験用供試体

図-1 に鉄筋埋設拘束試験用供試体を示す。供試体寸法は 100×100×1100mm とし，両側をねじ切り加工したφ32mm の丸鋼を拘束鉄筋として断面中央に配した。拘束鉄筋の中央部分 300mm はねじ切り加工をせず，厚さ 0.1mm のテフロンシートを 2 重に巻きコンクリートの付着を除去した。鉄筋の中央の表裏 2 箇所に箔ゲージ（測長：5mm）を貼り付け，拘束鉄筋のひずみを測定した。

2.3　使用材料および調合

表-2 に調合および使用材料を示す。単位水量および粗

表-1　実験概要

実験項目		供試体寸法（mm）	ひずみ測定ゲージ（形状）	養生方法/試験条件	試験材齢（日）	供試体数（本）
強度試験	圧縮強度	φ100×200	―	20℃水中	7,28,91	3
	割裂引張強度	φ100×200	―		7,28	3
圧縮クリープ試験	Basic Creep	100×100×200	小型埋込み（φ8×60mm）	20℃封緘/20℃・60%RH	7	2
	Total Creep	100×100×200			7	2
	圧縮強度	100×100×200	―		7	3
	自己収縮ひずみ	100×100×200	小型埋込み（φ8×60mm）		7	2
	乾燥収縮ひずみ	100×100×200			7	2
収縮ひび割れ試験	鉄筋埋設拘束試験	100×100×1100	箔（6×1mm）	20℃封緘/20℃・60%RH	7	2
	自己収縮ひずみ	100×100×400	埋込み（φ17×100mm）		7	2
	乾燥収縮ひずみ・質量変化率	100×100×400	埋込み（φ17×100mm），コンタクト		打設直後	2，2

*1 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）
*2 大分大学　大学院工学研究科博士後期課程　修士（工学）（非会員）
*3 大分大学　大学院工学研究科博士後期課程　修士（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教授　工博（正会員）

表−2　コンクリートの調合および使用材料

調合	W/B (%)	W/C (%)	混和材混入率 (%)	s/a (%)	単位量（kg/m^3）							スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	単位容積質量 (Kg/L)
					W	C	CfFA	S	G	SP (B×%)	助剤				
N	50.0	50.0	0	46.7	175	350	−	819	949	0.70	1.00A	19.5	3.9	21	2.31
FA	46.0	51.1	10	45.5	175	342	38	782	949	0.55	1.50A	19.5	4.5	22	2.29
FB	42.0	52.5	20	44.1	175	333	83	738	949	0.45	1.75A	19.5	4.9	22	2.26
FC	38.0	54.3	30	42.3	175	322	138	685	949	0.55	1.75A	19.5	4.3	23	2.27

W；水，C；普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3），
CfFA；高品質フライアッシュ（密度：2.31g/cm^3，強熱減量 0.98%，比表面積 3820 cm^3），
S；細骨材（混合砂：表乾密度 2.62 g/cm^3，吸水率 2.81%），G；粗骨材（硬質岩砕石：表乾密度 2.66 g/cm^3，吸水率 0.58%），
SP：ポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤，1A=B×0.001%，B=C+CfFA

骨材容積を全調合で一定とし，基準のコンクリート（以下，N）の水セメント比を 50%とした。混和材のフライアッシュには，強熱減量を 1%以下に抑えた高品質フライアッシュ（以下，CfFA）[3] を使用した。CfFA の混入率は，フライアッシュセメント A，B および C 種を想定して，全粉体の質量に対して 10，20 および 30%（以下，FA，FB および FC）の 3 水準とした。目標スランプ値は 18.0 ±1.5cm，目標空気量は 4.5±1.0%とした。

2.4　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，15 秒間空練りした後，水を投入して 2 分間練り混ぜた。

鉄筋埋設拘束試験および自己収縮試験の供試体の作製において，剥離剤を使用せず，型枠にテフロンシートおよび必要に応じてポリエステルフィルムを貼付け，型枠とコンクリートとの付着および摩擦の低減を図った。打設は恒温恒湿室（温度 20±1℃，相対湿度 60±5%）で行い，ブリーディングがほぼ終了した段階で表面を均し，封緘養生を行った。材齢 1 日で脱型後，強度試験用供試体は各試験材齢まで同室内にて水中養生とし，その他の供試体は全て封緘養生とした。

2.5　各種試験方法

(1) 圧縮強度および割裂引張強度試験

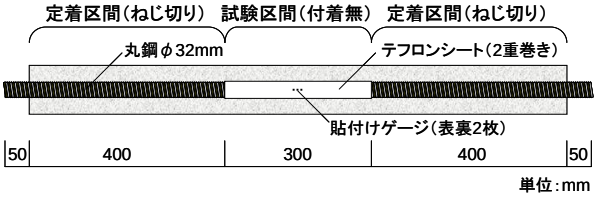
圧縮強度試験は材齢 7，28，91 日に JIS A 1108 に準じて行い，割裂引張強度試験は材齢7および28日に行った。

(2) 圧縮クリープ試験

圧縮クリープ試験は，材齢 7 日より，ゴムスプリング式装置を用い，角柱供試体を 4 体（Basic Creep および Total Creep 供試体各 2 体ずつ）縦に重ねた状態で行った。Basic Creep および自己収縮試験用供試体は封緘養生を継続し，その他の供試体は 4 面乾燥状態とした。載荷応力は，同一形状（100×100×200mm）の供試体を用いた載荷開始時の静的圧縮強度の約 30%の 9.0N/mm^2 とした。各供試体のひずみの測定には小型埋め込みゲージ（測長：60mm）を使用した。

(3) 収縮ひび割れ試験

鉄筋埋設ひび割れ試験は，材齢 7 日より，同室内にて 4 面乾燥状態とした。自己収縮ひずみの測定には埋込みゲージ（測長：100mm）を使用した。また，乾燥収縮ひずみの測定は埋込みゲージとコンタクトゲージを使用し，それぞれ別々の供試体で測定した。なお，自己収縮ひずみは打設直後から，乾燥収縮ひずみは材齢 7 日から測定を開始し，同時に質量変化率を測定した。



図−1　鉄筋埋設拘束試験用供試体

表−3　強度試験結果

調合記号	圧縮強度 (N/mm^2)			ヤング係数 (×10^{4}N/mm^2)			割裂引張強度 (N/mm^2)	
	7 日	28 日	91 日	7 日	28 日	91 日	7 日	28 日
N	28.8	41.0	47.5	2.71	3.03	3.27	2.34	2.67
FA	27.7	41.1	50.1	2.57	3.00	3.21	2.33	2.82
FB	26.5	40.3	50.6	2.61	3.01	3.28	2.31	2.55
FC	29.4	43.8	59.5	2.65	2.94	3.37	2.31	3.16

3. 実験結果および考察

3.1 強度試験結果

表−3 に圧縮強度および割裂引張強度試験結果を示す。材齢 28 日圧縮強度は全ての調合でほぼ等しい値を示し，当初の条件を満足した調合となっている。材齢 91 日までの増加量は，CfFA 混入率の増加と共に若干増加している。割裂引張強度も若干ばらつきはあるが，圧縮強度と同様の傾向を示した。

3.2　圧縮クリープ試験結果

各クリープは，単位応力あたりのひずみである Specific Creep ひずみとして算出した。式（1）にクリープの算定式を示す。

$$C_B = \frac{\varepsilon - \varepsilon_e - \varepsilon_a}{\sigma_0}$$

$$C_T = \frac{\varepsilon - \varepsilon_e - \varepsilon_s}{\sigma_0} \qquad (1)$$

$$C_D = C_T - C_B$$

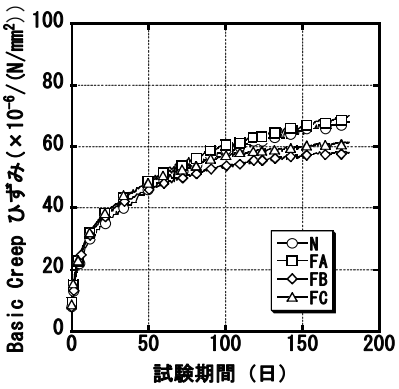


図-2　Basic Creep ひずみの経時変化

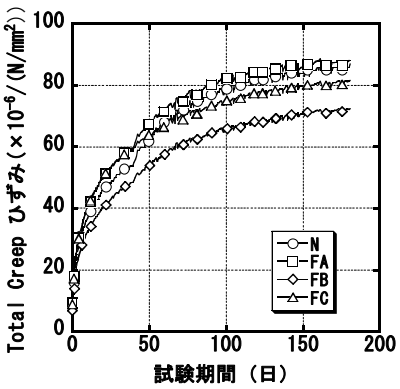


図-3　Total Creep ひずみの経時変化

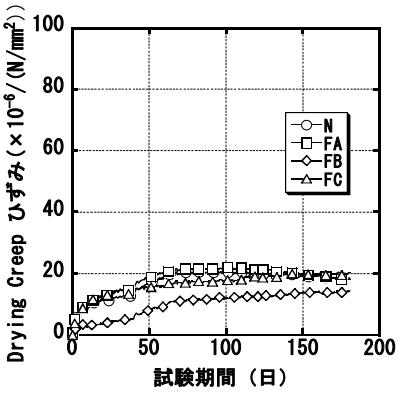


図-4　Drying Creep ひずみの経時変化

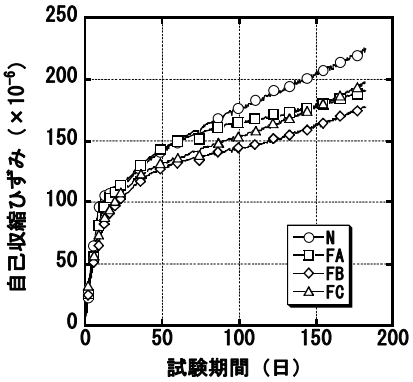


図-5　自己収縮ひずみの経時変化

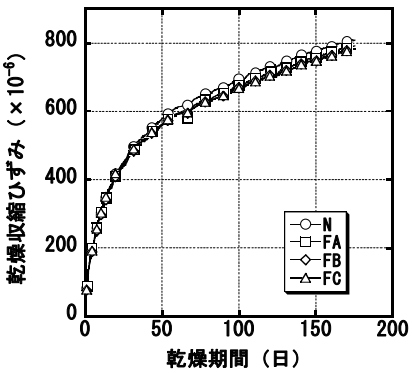


図-6　乾燥収縮ひずみの経時変化

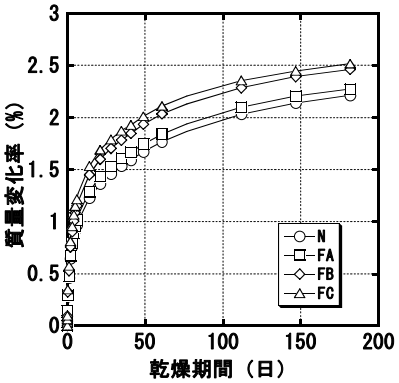


図-7　質量変化率の経時変化

ここに，C_B : Basic Creep ひずみ（$\times 10^{-6}$/（N/mm^2）），ε : 全ひずみ（$\times 10^{-6}$），ε_e : 瞬間ひずみ（$\times 10^{-6}$），ε_a : 自己収縮ひずみ，σ_0 : 載荷応力（N/mm^2），C_T : Total Creep ひずみ（$\times 10^{-6}$/（N/mm^2）），ε_s : 乾燥収縮ひずみ，C_D : Drying Creep ひずみ（$\times 10^{-6}$/（N/mm^2））

図-2 に Basic Creep ひずみの経時変化，**図-3** に Total Creep ひずみの経時変化，**図-4** に Drying Creep ひずみの経時変化を示す。

Basic Creep ひずみは，調合間に大きな差は見られなかった。また，Total Creep ひずみおよび Drying Creep ひずみは，FB が他より若干小さな値となったが，その他に明確な差は見られなかった。

これらのことから，同一強度とした場合，CfFA の混入がクリープひずみへ及ぼす影響は小さく，後述する乾燥収縮ひび割れに及ぼすクリープの影響も小さいものであると考えられる。

3.3　収縮試験結果

(1) 自己収縮ひずみ

図-5 に自己収縮ひずみの経時変化を示す。自己収縮ひずみは，CfFA を混入することで無混入よりも小さな値を示したが，混入率による傾向は明確ではない。

(2) 乾燥収縮ひずみおよび質量変化率

図-6 に乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。乾燥収縮ひずみは，調合間に明確な差は見られなかった。これは，単位水量を同一としたことが原因と考えられるが，単位水量を同一として強度をそろえた場合，フライアッシュ混入による乾燥収縮ひずみの明確な抑制効果はないものと考えられる。

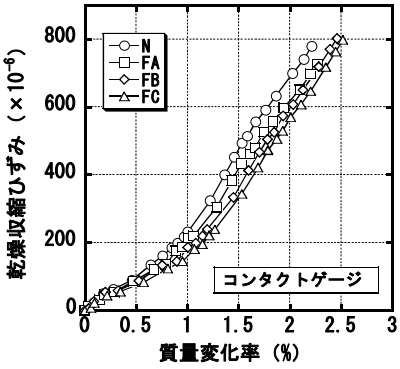


図-8　乾燥収縮ひずみと質量変化率の関係

図-7 に質量変化率の経時変化を示す。質量変化率は，同一の強度レベルとした場合も CfFA 混入率の増加と共に増加する結果となった。

図-8 に乾燥収縮ひずみと質量変化率の関係を示す。同一の乾燥収縮ひずみで比較すると，CfFA 混入率の増加と共に質量変化率は増加しており，フライアッシュを混入することで収縮に寄与しない脱水量が増えていることが

表-4　ひび割れ発生時の測定結果

調合	供試体 No.	材齢（日）		鉄筋ひずみ（×10^{-6}）		自由収縮ひずみ（×10^{-6}）		拘束応力（N/mm^2）		ひび割れ拘束応力推定値**（N/mm^2）	割裂引張強度*（N/mm^2）	応力強度比	拘束率（%）
		供試体	平均	供試体	平均	供試体	平均	供試体	平均				
N	A	16.0	19.0	120	131	362	404	2.20	2.40	1.38	2.59	0.85	66.8
	B	22.0		141		446		2.59			2.64	0.98	68.4
FA	A	15.5	16.0	107	112	335	345	1.96	2.05	1.42	2.71	0.72	68.2
	B	16.6		117		355		2.14			2.73	0.78	67.2
FB	A	19.9	17.7	127	118	391	358	2.34	2.17	1.46	2.49	0.94	67.4
	B	15.6		109		324		1.99			2.44	0.82	66.5
FC	A	13.6	13.6	105	104	301	301	1.93	1.91	1.51	2.96	0.65	65.1
	B	13.6		102		301		1.88			2.96	0.64	66.0

＊）式（3）および式（4）より算出した値
＊＊）式（5）より算出した値

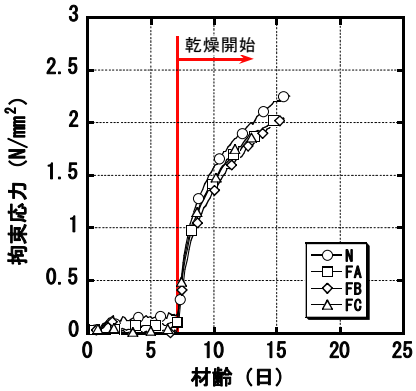


図-9　拘束応力の経時変化

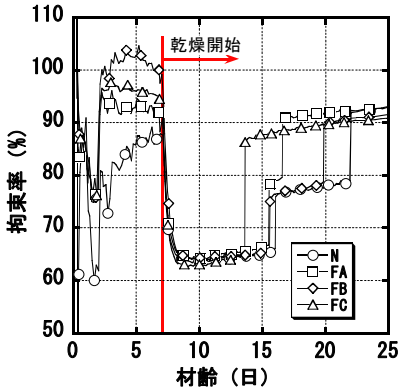


図-10　拘束率の経時変化

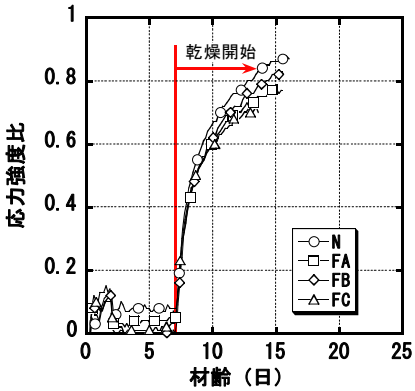


図-11　拘束応力強度比の経時変化

わかる。

3.4　収縮ひび割れ試験結果

表-4 に鉄筋埋設拘束試験におけるひび割れ発生時の測定結果一覧を示す。

ひび割れ発生材齢は，CfFA 混入率の増加とともに早くなる結果となった。これは，既報 [1] の結果と異なるが，単位水量一定の条件で材齢 28 日強度を揃えたために粉体量が多くなっていることが原因と考えられる。したがって，一般に言われているフライアッシュの収縮ひび割れ低減効果は，主としてフライアッシュの減水効果によるものと推察される。

今回の実験では，混和材を混入することで流動性が改善され混和剤使用量が減少している。そのため，実際には混和材の使用により，単位水量を減少させることができるため，このような混和材を使用したコンクリートのひび割れ性状を適切に評価するには，強度だけでなく，単位水量を調整した条件で評価する必要があると考えられる。

図-9 に拘束応力の経時変化を示す。コンクリートの拘束応力は次式で算出し，図は調合ごとに 2 体の供試体の平均値で表し，1 体目のひび割れ発生まで示している。

$$\sigma_c = -(E_s \times \varepsilon_s \times A_s)/A_c \qquad (2)$$

表-5　実験定数

調合	α	k
N	0.38	0.26
FA	0.52	0.28
FB	0.60	0.27
FC	0.67	0.29

ここに，σ_c：コンクリートの拘束応力（N/mm^2），E_s：鋼材の弾性係数（N/mm^2），ε_s：鋼材のひずみ，A_s：鋼材の断面積（mm^2），A_c：コンクリートの純断面積（mm^2）

拘束応力は，試験期間を通して，若干，基準コンクリートが大きい値を示しているが，調合間の差はほとんど見られない。

図-10 に拘束率の経時変化を示す。拘束率は乾燥開始前に大きな変動が見られるが，ひび割れ発生時の値は調合間に大きな差は無く，65～68%であった。

図-11 に拘束応力を割裂引張強度で除した拘束応力強度比の経時変化を示す。ここでの割裂引張強度は，CEB-FIP1990 モデルコード [4] および野口らによって提案されている式 [5] を基に式（3）および式（4）に示すように，調合ごとに本実験データに合うように各式に実験定数を乗じて算出した。**表-5** に各調合の実験定数を示す。

$$f_c(t_n) = \exp\left\{\alpha\left[1-\left(\frac{28}{t}\right)^{0.5}\right]\right\} f_{c28} \qquad (3)$$

$$f_t(t_n) = k \cdot f_c(t_n)^{0.637} \quad (4)$$

ここに，$f_c(t_n)$ ，f_{c28}：有効材齢 t_n および 28 日におけるコンクリートの圧縮強度（N/mm^2），$f_t(t_n)$：有効材齢 t_n におけるコンクリートの割裂引張強度（N/mm^2），t：材齢（日），α，k：本実験定数

図−11 より，ひび割れ発生時の拘束応力強度比は，0.6～0.9 程度であり，既報[1] と同程度の値である。

4. ひび割れ発生条件の検討

(1) ひび割れ発生条件式との対応

筆者らは，拘束率を一定に制御できる拘束試験装置で行った実験データを基に構築したひび割れ発生条件式を提案している[6]。この条件式は，ひび割れ発生時の拘束応力と拘束ひずみがそれぞれ独立して算出することができるものであるが，拘束ひずみを算出するためには，引張強度試験における破壊時のひずみデータが必要である。本実験では，割裂引張強度試験のみの実施であるため，ここでは，次式に示すひび割れ発生時の拘束応力について検討することとした。ただし，拘束率にはひび割れ発生時の値を用い，乾燥開始時の直接引張強度には割裂引張強度を代用した。

$$\sigma_{max} = 0.33 \cdot K^{0.24} \cdot e^{-3.52\times10^{-3}\left(\frac{19.3T(x/100)^{-3.55}}{6+T}\right)} \cdot \sigma_0 \quad (5)$$

ここに，σ_{max}：最大拘束応力（N/mm^2），K：拘束率（%），T：乾燥開始材齢（日），x：水セメント比（%），σ_0：乾燥開始時の直接引張強度（N/mm^2）

算出結果は**表−4** に示している。ひび割れ発生時の拘束応力と比較すると，すべて推定値が低い値を示している。この原因として，鉄筋埋設拘束試験では拘束率が時間の経過とともに変化すること，鉄筋のひずみからコンクリートのひずみを算出していること，割裂引張強度を代用したこと，供試体の拘束方法の違いなどが考えられるが，現時点では不明である。今後，このような拘束率が変化するひび割れ試験に対する本推定式の適用性について更なる検討が必要であると考えられる。

(2) 既往の文献データとの比較

既報[1] では，混和材の種類および混入率に関わらず，ひび割れ発生時の材齢と拘束応力に比例関係が見られた。そこで，本実験結果と既報[1] の実験結果，さらに文献[2] に記載された同じ鉄筋埋設拘束試験ではあるが乾燥条件が異なる実験データを収集し，比較検討することとした。**表−6** に収集したデータ一覧を示す。なお，今回収集したデータの条件として，乾燥開始材齢，乾燥温度および湿度がそれぞれ 7 日，20℃および 60%RH で，かつ本実験水準とおおよそ同一強度レベルである基準コンクリートの水セメント比が 50%の水準のものを選択した。

表−6　文献収集データ一覧

実験	図中表記	混和材混入率（%） F*	B*	SF*	乾燥条件	ひび割れ発生材齢（日）	拘束応力（N/mm^2）
既報[1]	プレーン	−	−	−	4 面	21.3	2.85
	プレーン	−	−	−		18.8	2.54
	フライアッシュ	20	−	−		21.2	2.71
	フライアッシュ	20	−	−		25.6	3.05
	高炉スラグ	−	27	−		18.6	2.47
	高炉スラグ	−	27	−		13.0	1.93
	高炉スラグ	−	42	−		13.2	2.00
	高炉スラグ	−	42	−		16.3	2.29
	高炉スラグ	−	67	−		11.8	1.84
	高炉スラグ	−	67	−		12.7	1.78
	3 成分	20	42	−		13.4	1.91
	3 成分	20	42	−		16.7	1.96
文献[2]	プレーン	−	−	−	2 面	34.0	3.20
	フライアッシュ	20	−	−		35.0	2.70
	プレーン	−	−	−		22.9	2.30
	プレーン	−	−	−		25.5	2.46
	フライアッシュ	10	−	−		28.4	2.33
	フライアッシュ	10	−	−		23.6	1.95
	フライアッシュ	20	−	−		25.9	2.30
	フライアッシュ	20	−	−		26.7	2.25
	フライアッシュ	30	−	−		21.7	1.90
	フライアッシュ	30	−	−		22.0	1.89
	3 成分	20	40	−		18.8	1.40
	3 成分	20	40	−		15.1	1.20
	フライアッシュ	10**	−	−		22.1	2.55
	フライアッシュ	10**	−	−		19.3	2.42
	高炉スラグ	−	42	−		24.0	2.02
	高炉スラグ	−	42	−		20.0	1.91
	高炉スラグ	−	42	−		27.0	2.33
	高炉スラグ	−	42	−		26.0	2.08
	高炉スラグ	−	42	−		22.0	2.28
	プレーン	−	−	−		27.9	2.50
	プレーン	−	−	−		42.4	2.63
	高炉スラグ	−	27	−		28.9	2.49
	高炉スラグ	−	27	−		25.4	2.22
	高炉スラグ	−	42	−		25.4	2.36
	高炉スラグ	−	42	−		28.8	2.23
	高炉スラグ	−	67	−		27.2	2.06
	高炉スラグ	−	67	−		24.9	2.18
	プレーン	−	−	−		24.0	2.27
	プレーン	−	−	−		26.0	3.00
	高炉スラグ	−	42	−		28.0	2.86
	高炉スラグ	−	42	−		25.0	1.94
	3 成分	10	42	−		51.5	2.87
	3 成分	20	42	−		49.4	2.30
	3 成分	30	42	−		39.8	1.98
	プレーン	−	−	−		47.6	3.33
	プレーン	−	−	−		28.2	2.64
	シリカフューム	−	−	8		20.6	2.41
	シリカフューム	−	−	8		11.2	1.62
	プレーン	−	42	−		42.8	3.00
	高炉スラグ	−	42	−		35.4	2.83

＊）F:フライアッシュ，B:高炉スラグ，SF:シリカフューム
＊＊）細骨材置換（外割り）

図−12 にそれら収集データひび割れ発生時の拘束応力と材齢の関係を，乾燥条件ごとと混和材種類ごとに示す。4 面乾燥の同一乾燥条件である既報の実験データは，本

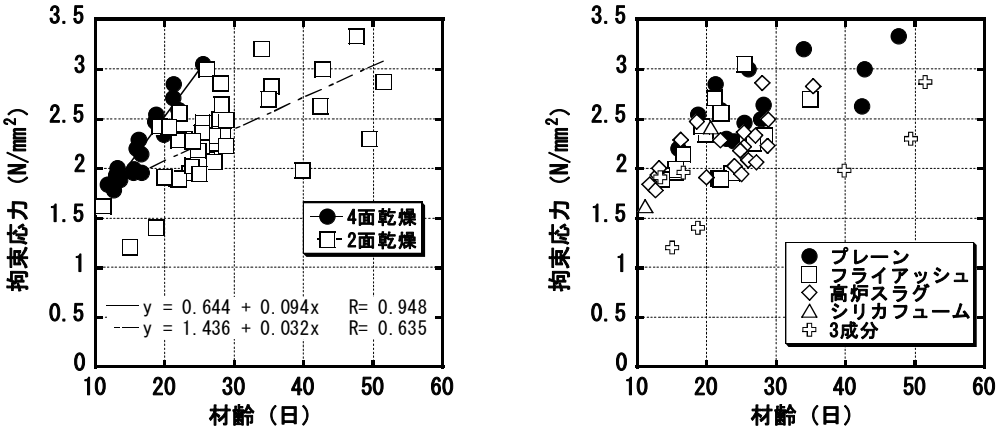


図-12　ひび割れ発生時の材齢と拘束応力の関係

実験データを含めて拘束応力と材齢に高い相関性が見られる。文献[2]より収集したデータはすべて2面乾燥条件であるため，本実験より乾燥は緩やかに進行する。そのため，ばらつきはあるが，ひび割れの発生が本実験と比べて比較的長期になり，また，拘束応力と材齢の関係については,その近似直線の勾配が緩やかになっているが，これは，クリープが影響しているものと考えられる。また，混和材種類で比較すると，フライアッシュ，高炉スラグおよびシリカフュームを単独で混入した場合には明確な傾向が見られないが，フライアッシュと高炉スラブを両方混入した3成分系のものは全体的に拘束応力が低く，特に2面乾燥のときに差が顕著である。

5. まとめ

本研究では，フライアッシュを混入したコンクリートのひび割れ抵抗性を検討するために，単位水量を一定とし,水セメント比を調整することによって材齢28日強度が基準コンクリートと同等となるようにフライアッシュを混入した条件に対して，各種強度試験，収縮試験および鉄筋埋設拘束試験を実施した。その結果，本研究の範囲内で以下の知見を得た。

(1) クリープひずみ，自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみにフライアッシュ混入による明確な差はない。

(2) ひび割れ発生材齢は，フライアッシュ混入率が大きいほど，若干，早くなる傾向にある。

(3) ひび割れ発生時の水中養生の割裂引張強度に対する応力強度比は,混入率によらず0.6～0.9である。

(4) ひび割れ発生時の材齢と拘束応力には相関性が見られるが，乾燥が緩やかに進行するほど，その近似線の傾きは緩やかになる。

6. あとがき

以上のように，単純に混和材をセメントの内割り置換した場合と，強度レベルを同一とした場合でひび割れ性状が異なることが明らかとなった。今回，強度レベルを同一とした条件では，単位水量を一定としたが，混和材の混入により流動性が改善されているため，単位水量を減少させることが可能である。したがって，混和材混入コンクリートのひび割れ性状の適切な評価には，強度だけでなく,単位水量も最適な条件で評価する必要がある。

謝辞

本研究の一部は大分大学VBLプロジェクト研究A「研究課題：低炭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，研究代表：大谷俊浩」の助成を受け実施した。また，本実験の遂行にあたり，山口福祉文化大学講師濱永康仁先生，大分大学コンクリート研究室大学院生（当時）成田健志君をはじめとする研究室一同のご助力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 大谷俊浩ほか：鉄筋埋設拘束試験による混和材混入コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性評価，コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.221-226, 2011.7

2) 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研究委員会報告書，2010.9

3) 李相培ほか：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.183-188，2007.7

4) COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON : CEB-FIP Model Code 90, Tomas Telford, 1990

5) 野口貴文ほか：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文報告集，No.472，pp.11-16，1995

6) 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報告集，No.634，pp.2051-2060，2008