

論文 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

大谷 俊浩*¹・濱永 康仁*²・上田 賢司*³・佐藤 嘉昭*⁴

要旨：本研究では、高炉スラグ微粉末および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、打設後からの自己収縮ひずみの影響も考慮できる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、高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートは、無混入コンクリートに対して、混入率が高いほどひび割れの発生が早くなり、フライアッシュは逆に遅くなるのが分かった。高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートが早くひび割れが発生する一つの理由として、若材齢の自己収縮に起因する拘束応力が大きいことが考えられた。

キーワード：収縮ひび割れ、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、自己収縮、クリープ、鉄筋埋設

1. はじめに

コンクリートの収縮ひび割れは、コンクリート構造物の耐久性を低下させる大きな要因となる。そのため、古くからコンクリートのひび割れに関する研究が数多く行われ、収縮ひび割れ抵抗性を評価する試験方法も数多く提案されている¹⁾。最近、JCI「混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善に関する混和材研究委員会」から埋設した鉄筋の拘束による収縮ひび割れ試験方法（以下、鉄筋埋設拘束試験）が提案された²⁾。この試験法は、JCI「自己収縮研究委員会」により提案されているコンクリートの自己収縮応力試験方法³⁾を参考として乾燥収縮ひび割れ試験用に改良されたものであり、打設直後から拘束鉄筋のひずみを測定することができ、自己収縮ひずみの影響を考慮すべきコンクリートのひび割れ性状を評価するのに適していると思われる。

そこで、本研究では、この鉄筋埋設拘束試験の妥当性の検証と、混和材混入コンクリートのひび割れ抵抗性を評価するため、高炉スラグ微粉末（以下、BFS）およびフライアッシュ（以下、FA）混入コンクリートの各種強度試験、ひび割れ試験およびクリープ試験を実施した。

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、載荷応力とクリープ算出用に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体概要図を示す。拘束用の埋設鉄筋は両側をねじ切り加工したφ32mmの丸鋼を使用した。中央部分300mmはねじ切り加工をせず、厚さ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箇所には箔ゲージ(測長:5mm)を貼り付け、拘束鉄筋のひずみを測定した。

2.3 使用材料および調査

表-2に調査および使用材料を示す。混和材の混入はセメント代替とし、水結合材比(W/B)50%および粗骨材

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°C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	20°C封緘/ 20°C・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		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	20°C封緘/ 20°C・60%RH	7	2
	自己収縮ひずみ	100×100×400	7	2	
	乾燥収縮ひずみ・重量変化率	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 山口福祉文化大学講師 博士(工学) (非会員)

*3 (株)ゼロテクノコンサル 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

調合記号	W/B (%)	混和材種類	混和材置換率 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	単位容積質量 (Kg/L)
					W	C	FA	BFS	S	G1	G2	SP (B×%)	助剤				
N	50	-	0	46.5	175	350	-	-	825	437	512	0.75	1.5A	18.5	4.6	27	2.31
FB		FA	20	45.8	175	280	70	-	803	437	512	0.55	3.5A	18.0	4.6	28	2.29
BA		BFS	27	46.3	175	256	-	94	820	437	512	0.7	1.5A	18.5	4.4	32	2.31
BB		BFS	42	46.3	175	203	-	147	817	437	512	0.65	2.0A	18.0	4.9	29	2.29
BC		BFS	67	46.1	175	116	-	234	812	437	512	0.6	2.5A	19.0	4.7	30	2.29
FB-BB		FA+BFS	20+42	45.6	175	133	70	147	795	437	512	0.35	9.0A	17.0	4.7	31	2.28

W; 水, C; 普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³), FA; フライアッシュ (密度 2.24g/cm³, 比表面積 4130cm²/g), BFS; 高炉スラグ微粉末 (密度 2.88g/cm³, 比表面積 4170cm²/g), S; 細骨材 (混合砂: 表乾密度 2.64 g/cm³, 粗粒率 2.65), G1; 粗骨材 (碎石: 表乾密度 2.66 g/cm³, 実積率 59.0%), G2; 粗骨材 (碎石: 表乾密度 2.66 g/cm³, 実積率 60.0%), s/a; 細骨材率, SP: ポリカルボン酸エーテル系化合物系高性能 AE 減水剤を使用, 1A=B×0.001%

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	35.5 (36.3)	46.7	55.5	2.64	3.13	3.55	2.71	3.83
FB	26.8 (24.4)	41.1	56.1	2.47	2.93	3.51	2.24	3.66
BA	27.1 (26.5)	45.1	60.8	2.39	2.97	3.72	2.31	3.63
BB	25.1 (23.6)	43.9	57.9	2.24	2.92	3.55	2.51	3.91
BC	23.0 (21.7)	37.9	55.3	2.03	2.89	3.56	2.15	3.92
FB-BB	18.2 (16.3)	35.7	51.9	2.11	2.76	3.40	1.79	3.37

*: カッコ内の数値は 100×100×200mm のクリープ載荷応力算定用角柱供試体の値

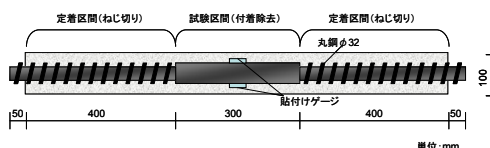


図-1 鉄筋埋設ひび割れ試験用供試体

容積を全調合で一定とした。混和材の置換率は、FA がフライアッシュセメント B 種を想定した 20% (以下, FB) の 1 水準, BFS が高炉セメント A, B および C 種を想定した 27, 42 および 67% (以下, BA, BB および BC), さらに 3 成分として FA で 20%かつ BFS で 42%置換した水準 (以下, FB-BB) を設けた。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 軸ミキサーを使用し, 15 秒間空練りした後, 水を投入して 2 分間練り混ぜた。ただし, FB-BB については, AE 助剤を追加投入し, 練混ぜ時間を延長することで空気量を調整した。

全ての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°C, 相対湿度 60 ± 5%) で行い, 材齢 1 日で脱型した。

その後, 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 30%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, 乾燥収縮ひずみの測定には埋込みゲージとコンタクトゲージを使用した。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, 同時に重量変化率を測定した。

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。圧縮強度は, 材齢 7 および 28 日では, BFS 置換率の増加とともに低下し, FB および FB-BB も N より小さな値を示した。材齢 91 日においては, FA または BFS を単独で混入したものは, N と同等以上となった。これは, FA および BFS のそれぞれの長期強度増進効果によるものと考えられる。しかしながら, FB-BB は材齢 91 日においても N の強度を上回らなかった。

割裂引張強度は, 材齢 7 日においては圧縮強度と同様の傾向を示し, 材齢 28 日では FB-BB が N より若干低い値を示したが, その他は同程度の値を示した。

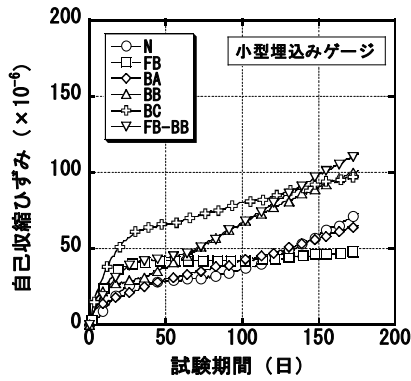


図-2 自己収縮ひずみの経時変化
(100×100×200mm)

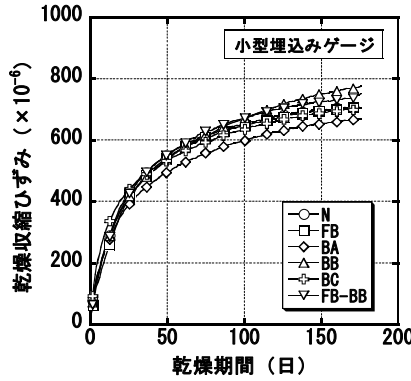


図-3 乾燥収縮ひずみの経時変化
(100×100×200mm)

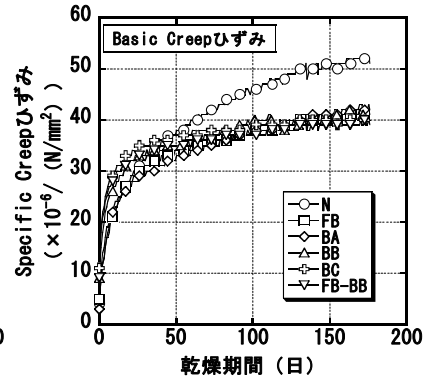


図-4 Basic Creep ひずみの経時変化

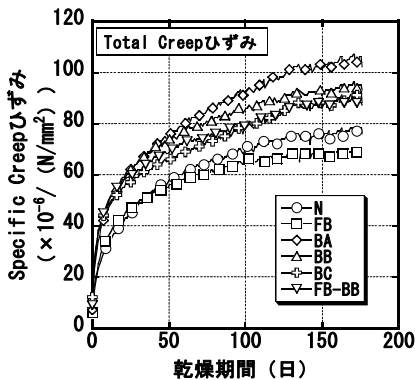


図-5 Total Creep ひずみの経時変化

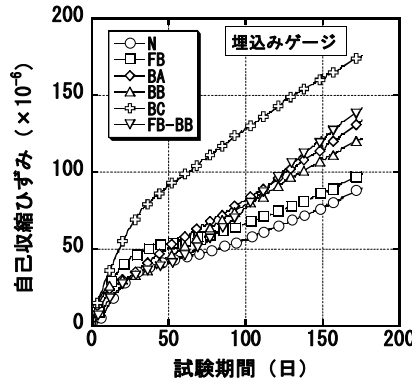


図-6 自己収縮ひずみの経時変化
(100×100×400mm)

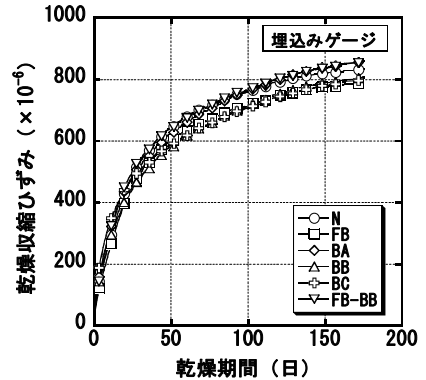


図-7 乾燥収縮ひずみの経時変化
(100×100×400mm)

3.2 圧縮クリープ試験結果

(1) 自己収縮ひずみ

図-2 に自己収縮ひずみの経時変化を示す。自己収縮ひずみは、クリープ試験開始後の挙動を確認するために実験開始時(材齢7日)を原点として示している。自己収縮ひずみは、N に比べ、FB は低い値を示し、BFS 混入の場合、N に比べ、BA は同等であったが、BB、BC およびFB-BB は試験期間180日で5割ほど大きな値を示した。これらの結果は、FA については池永ら⁴⁾の報告、BFS については二戸ら⁵⁾および伊与田ら⁶⁾の報告と傾向が一致するものである。

(2) 乾燥収縮ひずみ

図-3 に乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。乾燥収縮ひずみは、N に比べ、FA で置換した場合は同程度であったが、BFS で置換した場合、BA は小さく、BB は大きく、BC は同程度になるなど、BFS 置換率の影響による明確な傾向は確認できない。一般に、FA を混入することで乾燥収縮ひずみは減少すると言われており、本実験でも同様の傾向となった。しかしながら、BFS 混入が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は、置換率が高いほど収縮量が大きくなるという報告⁷⁾もあれば、高炉セメントB種相当の置換率までは差がなく、高炉セメントC種相当で低減す

るとの報告⁸⁾も見られ、一貫した評価に至っていない。本実験でも明確な傾向を見出すことはできなかった。

(3) クリープひずみ

図-4 に Basic Creep ひずみの経時変化、図-5 に Total Creep ひずみの経時変化を示す。両図のクリープひずみの値は、載荷応力で除したスプレッドクリープひずみとして表している。Basic Creep ひずみは、N に比べてFA および BFS を混入することで減少したが、混和材の種類や置換率による明確な差は認められなかった。Total Creep ひずみは、N に比べてFB は減少したが、BFS で置換したものと3成分のものは増加する結果となった。浮田らの報告⁹⁾によれば、FA を15~30%混入した場合、クリープ係数が減少することが示されており、本実験と同様の傾向を示した。しかしながら、BFS を混入したコンクリートのクリープの研究報告は少ないが、混入することで単位クリープが減少することが報告されており^{10, 11)}、本研究結果では異なる結果となった。

3.3 収縮ひび割れ試験結果

(1) 自己収縮ひずみ

図-6 に100×100×400mm 角柱供試体を用いた自己収縮ひずみの経時変化を示す。N とFB が同等の値を示し、図-2 と比較して傾向に若干の相違が認められる。また、

絶対量を比較すると、100×100×200mm 角柱供試体よりも 100×100×400mm 角柱供試体を用いた方が全体的に大きな値を示した。

(2) 乾燥収縮ひずみおよび重量変化率

図-7 に 100×100×400mm 角柱供試体を用いて埋込みゲージで測定した乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。図-3 と比較して調合間の差が小さく、若干傾向が異なる調合も認められるとともに、全体的に大きな値を示している。本実験では共に小口面をシールした 4 面乾燥条件で行っているため、供試体表面積に対する体積の割合 (V/S) は等しく、生じる収縮量は同程度になることになる。したがって、これらの傾向の差には、測定に使用した埋込みゲージの違いが影響していると考えられる。図-3 の小型埋込みゲージに比べて図-7 の埋込みゲージの方が精度が高く、測長も長いので、本実験条件では混和材混入が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は小さいと考えられるが、3.2(2)で述べたように、過去の知見においても混和材混入コンクリートの乾燥収縮挙動に一貫した傾向がみられないため、混和材混入コンクリートの収縮性状の解明には更なるデータの蓄積による検討が必要である。

図-8 に重量変化率の経時変化を示す。重量変化率は FA で置換することにより増加したが、BFS で置換することにより減少する結果となった。また、3 成分混合とすることで、FA 単独の場合よりも重量変化率は減少した。

図-9 にコンタクトゲージで測定した供試体における乾燥収縮ひずみと重量変化率の関係を示す。図中の最後位置が乾燥期間 180 日を示しているが、同一供試体寸法である図-7 と比較して全体的に小さな値を示した。また、同一の重量変化率で比較すると、FB および FB-BB は N に対して乾燥収縮ひずみの値が小さく、BA および BB は N と同程度であるが、BC は大きな値を示した。

(3) 鉄筋埋設拘束試験

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。2 体平均のひび割れ発生材齢は、N

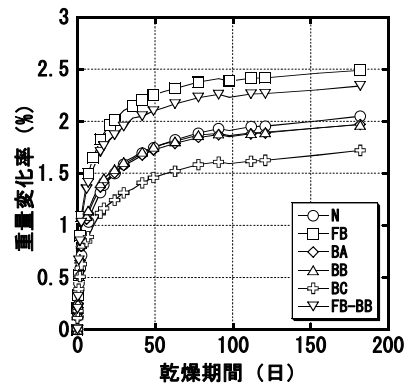


図-8 重量変化率の経時変化

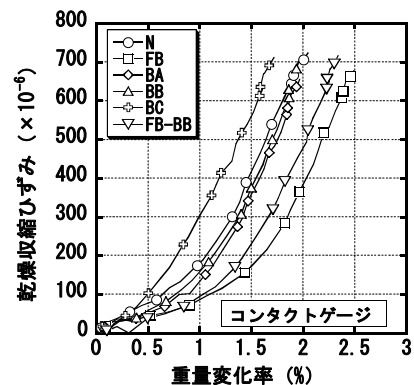


図-9 乾燥収縮ひずみと重量変化率の関係

が 20.1 日、FB が 23.4 日、BA、BB および BC がそれぞれ 15.9 日、14.8 日および 12.4 日で、FB-BB が 15.0 日であり、乾燥開始後 5.4 日～16.4 日という非常に早い段階でひび割れが発生した。ひび割れ発生材齢を比較すると、N に対して FB は遅くなったが、BFS 置換の場合に早くなり、BFS 置換率が高いほど早くなる結果となった。3 成分のものは同一 BFS 置換率と同程度となった。また、ひび割れ発生時の鉄筋ひずみ量および拘束率は、それぞれ $100\sim170\times 10^{-6}$ および 60%程度であった。

図-10 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、次式で算出した。

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 ($\times 10^{-6}$)		自由収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)		拘束応力 (N/mm^2)		割裂引張強度 (N/mm^2)	応力強度比	拘束率 (%)
		単体	平均	単体	平均	単体	平均	単体	平均			
N	A	21.3	20.1	-155	-147	-355	-374	2.85	2.70	3.50	0.81	60.5
	B	18.8		-138		-393		2.54		3.45		
FB	A	21.2	23.4	-147	-157	-361	-396	2.71	2.88	3.32	0.81	59.1
	B	25.6		-166		-431		3.05		3.45		
BA	A	18.6	15.8	-134	-120	-378	-326	2.47	2.20	3.27	0.76	59.4
	B	13.0		-105		-273		1.93		2.98		
BB	A	13.2	14.8	-109	-117	-286	-313	2.00	2.15	3.22	0.62	61.9
	B	16.3		-125		-339		2.29		3.40		
BC	A	11.8	12.3	-100	-99	-268	-280	1.84	1.81	2.94	0.63	62.6
	B	12.7		-97		-292		1.78		3.02		
FB-BB	A	13.4	15.0	-104	-105	-273	-309	1.91	1.94	2.62	0.73	61.9
	B	16.7		-107		-344		1.96		2.82		

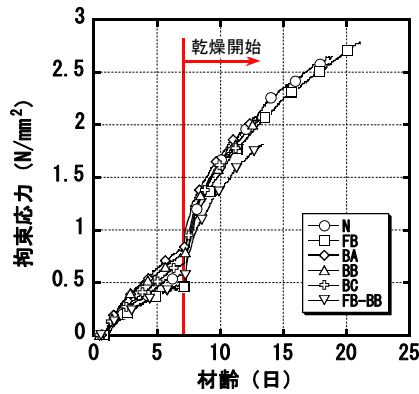


図-10 拘束応力の経時変化

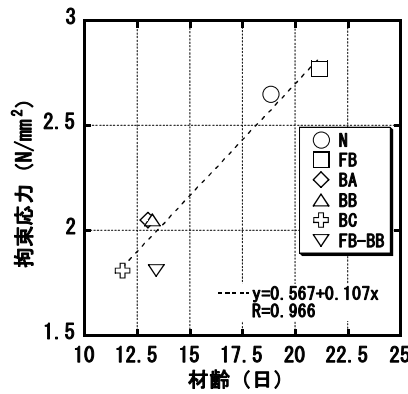


図-11 ひび割れ発生時の拘束応力と材齢の関係

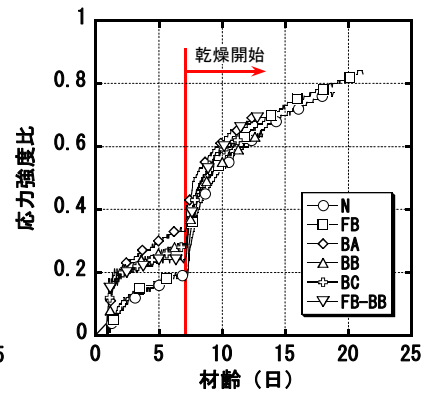


図-12 拘束応力強度比の経時変化

$$\sigma_c = -(E_s \times \varepsilon_s \times A_s) / A_c \quad (1)$$

ここに、 σ_c ：コンクリートの拘束応力 (N/mm²)

E_s ：鋼材の弾性係数 (N/mm²)

ε_s ：鋼材のひずみ

A_s ：鋼材の中央部断面積 (mm²)

A_c ：コンクリートの純断面積 (mm²)

表-5 式 (2) および式 (3) に用いた実験定数

調合	α	k
N	0.31	0.31
FB	0.56	0.33
BA	0.59	0.31
BB	0.59	0.34
BC	0.70	0.37
FB-BB	0.79	0.33

拘束応力は、特に図-10 に乾燥開始として示すラインより以前の封緘養生を行った材齢7日までに差が見られ、BFSで置換したものはNに比べて高い応力を示し、FAで置換したものは低い値を示した。そのため、前述したBFSの置換によりひび割れの発生が早くなった一つの原因として、この若材齢時の拘束応力が高くなったことが影響しているものと考えられる。

図-11 にひび割れ発生時の拘束応力と材齢の関係を示す。ひび割れ発生時の拘束応力と材齢の関係は、混和材の種類の違いやBFS置換率の違いに関わらず、相関関係が認められた。ただし、3成分混合は拘束応力が低い傾向を示しているように見られることから、この点については更なる検討が必要と思われる。

図-12 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¹²⁾および野口らによって提案されている式¹³⁾を基に式(2)および式(3)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。その実験定数を表-5に示す。

$$f_c(t_n) = \exp\left\{\alpha \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{0.5}\right]\right\} f_{c28} \quad (2)$$

$$f_t(t_n) = k \cdot f_c(t_n)^{0.637} \quad (3)$$

ここに、 $f_c(t_n)$ ：有効材齢 t_n におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

f_{c28} ：有効材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

$f_t(t_n)$ ：有効材齢 t_n におけるコンクリートの割裂引張強度 (N/mm²)

α, k ：本実験定数

拘束応力強度比は、材齢7日までの封緘養生期間においてBFSで置換したものが高い値を示したが、材齢7日以降の乾燥期間における拘束応力強度比の進展には調合間に大きな差は見られない。また、ひび割れ発生時の応力強度比は0.6~0.8であり、JIS A 1151の一軸拘束ひび割れ試験により得られた値と同程度の値を示し³⁾、本試験法はコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の評価試験として妥当であると思われる。ただし、乾燥直後、表層には大きな引張応力が発生し、数日間はその影響が大きく作用するものと考えられる。今回の実験結果のように乾燥開始後早い段階でひび割れが発生した場合、その影響が関与することが考えられ、コンクリートのひび割れ抵抗性を適切に評価できない可能性が考えられる。そのため、今回の実験のように4面乾燥ではなく2面乾燥状態とするか、鉄筋径小さくして拘束度を小さくすることにより、その影響度を小さくする必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究では、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを単独もしくは両方を普通ポルトランドセメントと内割り置換したコンクリートのひび割れ抵抗性を検討するた

めに、各種強度試験、圧縮クリープ試験および鉄筋埋設ひび割れ試験を実施した。その結果、本研究の範囲内で以下の知見を得た。

- 1) Basic Creep ひずみは、無混入に比べてフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混入することで減少したが、混和材種類や置換率による明確な差は認められない。Total Creep ひずみは、無混入に比べてフライアッシュで置換することで減少するが、高炉スラグ微粉末で置換したものと3成分のものは増加する。
- 2) 自己収縮ひずみは、無混入に比べて、フライアッシュで置換することで若干小さく、高炉スラグ微粉末置換率が高いほど増加する。
- 3) 乾燥収縮ひずみは、フライアッシュで置換すると無混入と同程度となり、高炉スラグ微粉末で置換した場合は置換率により異なり、その傾向は明確でない。
- 4) ひび割れ発生材齢は、無混入に対してフライアッシュ置換の場合に遅く、高炉スラグ微粉末置換率が高いほど早くなる。また、3成分のものは同一高炉スラグ微粉末置換率と同程度となる。高炉スラグ微粉末を混入することでひび割れの発生が早くなる原因の一つとして、若材齢時に自己収縮に起因する拘束応力が大きくなっていることが考えられる。
- 5) 水中養生した割裂引張強度に対する拘束応力強度比は、材齢7日までの封緘養生期間において高炉スラグ微粉末を混入したものが高い値を示したが、材齢7日以降の乾燥期間における拘束応力強度比の進展には調合間に大きな差異は見られない。また、ひび割れ発生時の応力強度比は、混和材種類によらず0.6~0.8である。これらの値はJISの一軸拘束ひび割れ試験で得られる値と同程度であり、鉄筋埋設ひび割れ試験はコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の評価試験として妥当であると思われる。

以上のように、ひび割れ発生材齢は、無混入に対してフライアッシュ置換の場合に遅く、高炉スラグ微粉末置換率が高いほど早くなった。しかしながら、無混入に対するクリープは、フライアッシュで置換することで減少し、高炉スラグ微粉末で置換することで増加している。クリープは、収縮に起因して発生する応力を緩和する働きをするが、今回の実験ではその効果が見られない結果となった。今後、クリープの影響を考慮したひび割れの解析を行い、その影響について検討する必要がある。また、収縮量を測定するゲージの種類の影響も大きく、この点についても更なる検討が必要である。

謝辞

本実験は、JCI TC 083A「混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善に関する混和材研究委員会 委員

長：名和豊春」の共通実験として行ったものである。また、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ものである。本実験の遂行にあたり、大分大学コンクリート研究室大学院生成田健志君をはじめとする研究室一同のご助力を得た。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1) 濱永康仁ほか：ひずみ制御機能を備えたコンクリートの収縮ひび割れ試験装置の開発、日本建築学会構造系論文集、第616号、pp.1-7、2007.6
- 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) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書、1996.11
- 4) 池永博威ほか：フライアッシュを用いたコンクリートの乾燥収縮に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、pp.639-640、1998.9
- 5) 二戸信和ほか：高炉セメントの発熱と収縮に及ぼすスラグ粉末度とSO₃の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.2、pp.121-126、2008
- 6) 伊与田岳史ほか：高炉セメント中のスラグ粉末度と石こう量が水和発熱と自己収縮特性に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.1、pp.99-104、2007
- 7) 君島健之ほか：中部国際空港エプロン舗装に使用したコンクリートの収縮特性、材料、Vol.55、No.4、pp.424-431、2006.4
- 8) 日本建築学会：高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説、2001
- 9) 浮田和明ほか：分級フライアッシュを混入したコンクリートの基礎物性、コンクリート工学年次論文集、Vol.10、No.2、pp.1-6、1988
- 10) 浅野研一ほか：高強度コンクリートの基礎的物性に関する実験研究、日本建築学会学術講演梗概集、pp.391-392、1992.8
- 11) 上西隆、林芳尚：高強度コンクリートの基本特性と構造体強度について、コンクリート工学年次論文集、Vol.13、No.1、pp.231-236、1991
- 12) COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON：CEB-FIP Model Code 90, Tomas Telford, 1990
- 13) 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