

論文 フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートのひび割れ抵抗性

齋藤 淳^{*1}・堺 孝司^{*2}・鈴木 康範^{*3}・福留 和人^{*4}

要旨：普通ポルトランドセメントの質量の40%をフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末で置換したローカーボンコンクリートの特性について、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末によるセメントの置換割合に相違を設けて実験を行い、ひび割れ抵抗性の観点から評価した。ローカーボンコンクリートは若材齢時の強度発現は遅いものの中長期的には十分な強度が得られることを確認した。また、実験結果を反映した温度応力解析結果および収縮ひび割れ評価試験結果を用いて、ローカーボンコンクリートのひび割れ抵抗性の向上効果を定量的に明らかにした。

キーワード：フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末, CO₂排出量, ひび割れ抵抗性

1. はじめに

近年、あらゆる分野で低炭素技術の開発に向けた取り組みが活発に行われており、建設産業においても、そのような活動の重要性が増してきている。建設産業における主要材料の一つであるコンクリートは、その構成材料の製造時に多量のCO₂が排出されており、環境負荷が大きな建設資材である¹⁾。

コンクリートの性能を高める方策として、従来から高強度コンクリートや高耐久コンクリートに関する研究が行われているが、近年は、これらに加えて、低環境負荷コンクリートに関する研究が求められている。

コンクリートの材料の中で最もCO₂を排出する材料はセメントである。単位コンクリート当りのセメント量は、フライアッシュや高炉スラグ微粉末を混和材として用いることで低減できる。これらを用いたコンクリートは、CO₂排出量が少ないローカーボンコンクリートであり、環境負荷を低減する一つの有効な手段である。その代表的な例が、高炉セメントやフライアッシュセメントなどの従来型の混合セメントであるが、これまで混和材は、産業副産物の有効利用のコンセプトの下で用いられてきた。

一方、混和材の利用によるセメント量の低減はコンクリートが有するローカーボン性能を高める効果はあるが、若材齢強度の低下や中性化速度の増大などの性能の低下を招くためフライアッシュや高炉スラグ微粉末の置換率には自ずと限界がある。近年、CO₂排出量の削減の観点から混和材をセメントに高置換する研究が行われているが、コンクリートの若材齢強度が著しく低下することが報告²⁾されている。

今後、混和材を利用していく上でコンクリートの「力学・耐久性能」と「ローカーボン性能」との最適化を図ることが重要であり、両者のバランスのとれたコンクリートの開発が望まれる。

これまで筆者らは、比較的少ない置換率のフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を併用した三成分系セメントを用いたコンクリートに対して基礎的な検討を行ってきており、混和材置換率を40%とした場合に「力学・耐久性能」と「ローカーボン性能」の最適化が図れる可能性を見出した³⁾。

本研究では、普通ポルトランドセメントの質量の40%をフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末で置換したローカーボンコンクリートを対象として、強度特性、断熱温度上昇特性および収縮ひび割れ抵抗性に関する室内試験を行った。これらの結果を、ひび割れ抵抗性の観点から評価し、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末によるセメントの置換割合の適切な組合せを検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用したコンクリートを構成する材料の種類および品質を表-1に示す。

2.2 コンクリートの製造および配合

コンクリートの製造は、温度20℃の試験室で行い、容量60リットルの水平二軸強制練りミキサを用いて行った。最初にセメント、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、細骨材、粗骨材をミキサに投入して15秒間空練りし、次に水と混和剤を加えて120秒間練り混ぜた後、排出した。

*1 (株)間組 技術・環境本部 技術研究所 (正会員)

*2 香川大学 工学部 安全システム建設工学科教授 工博 (正会員)

*3 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 工博 (正会員)

*4 (株)間組 技術・環境本部 技術研究所 博(工) (正会員)

表-1 使用材料の品質

種類	記号	品質
普通ポルトランドセメント	C	密度：3.15g/cm ³ 比表面積：3270cm ² /g
フライアッシュ II種	FA	密度：2.25g/cm ³ 比表面積：4150cm ² /g
高炉スラグ微粉末 4000	BS	密度：2.88g/cm ³ 比表面積：4250cm ² /g
細骨材 (川砂)	S	表乾密度：2.62g/cm ³ 吸水率：1.35%
粗骨材 (碎石)	G1 (2010)	表乾密度：2.71g/cm ³ 吸水率：0.69%
	G2 (1505)	表乾密度：2.71g/cm ³ 吸水率：0.77%
高性能 AE 減水剤	—	ポリカルボン酸エーテル系化合物
AE 剤	—	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

コンクリートの配合は水結合材比 (W/B と略記) を 40%、細骨材率 (s/a と略記) 46%、高性能 AE 減水剤の量を結合材に対して 0.8% を乗じる量の一定とした。フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末はセメントの質量置換とした。フライアッシュの置換率 (FA 置換率と略記) と、高炉スラグ微粉末の置換率 (BS 置換率と略記) は、これまでの検討成果³⁾から「力学・耐久性」と「ローカーボン性能」のバランスが良いと考えられる置換率の合計が 40% となる表-2 の組合せとした。スランブ (JIS A 1101)、空気量 (JIS A 1128) を試験し、目標スランブ 12.0±2.5cm、目標空気量 4.5±1.5% が得られるように単位水量および AE 剤の添加量を調整した。コンクリートの配合を表-3 に示す。

2.3 試験項目および方法

(1) 圧縮強度

圧縮強度は JIS A 1108 に準拠して測定した。φ100×200mm の円柱供試体を用いて、試験材齢は 3, 7, 28,

表-2 セメントに対する混和材料の置換率

混和材料	フライアッシュ			
	置換率	0%	10%	20%
高炉スラグ微粉末	0%	○	—	—
	20%	—	—	○
	30%	—	○	—
	40%	○	—	—

56 および 91 日とした。なお、脱型は材齢 1 日とし、脱型までは封緘養生、脱型後は試験直前までは標準水中養生を行った。

(2) 割裂引張強度

割裂引張強度は JIS A 1113 に準拠して測定した。供試体寸法、試験材齢、養生方法などの条件は圧縮強度試験と同様とした。

(3) 断熱温度上昇特性

断熱温度上昇特性は、空気循環式の断熱温度上昇試験機を用いて試験した。供試体は φ400×380mm の円柱形とし、測定期間は 14 日間とした。

(4) 収縮ひび割れ抵抗性

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に関する研究委員会」から提案されているコンクリートの収縮ひび割れ評価試験方法⁴⁾を用いて、乾燥収縮と自己収縮の両方を合わせた収縮に対するひび割れ抵抗性を評価した。供試体の形状を図-1

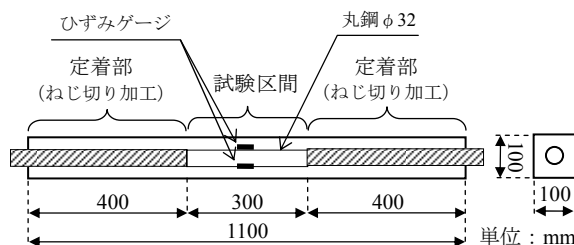


図-1 収縮ひび割れ評価試験供試体の形状

表-3 コンクリートの配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							スランブ (cm)	空気量 (%)
			水	結合材		細骨材	粗骨材				
				セメント	混和材		G1	G2			
				W	C				FA		
FA 置換率 0% -BS 置換率 0%	40.0	46.0	140	350	—	—	849	618	412	14.0	3.8
FA 置換率 20% -BS 置換率 20%			129	193	65	65	859	626	417	14.5	3.6
FA 置換率 10% -BS 置換率 30%			131	197	33	98	859	624	416	13.5	4.9
FA 置換率 0% -BS 置換率 40%			133	200	—	133	859	626	417	13.0	4.0

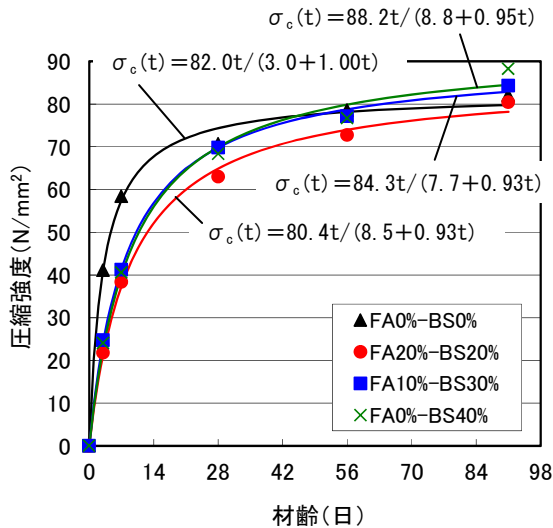


図-2 圧縮強度の試験結果

に示す。定着部に M33 相当のねじ切り加工を施した丸鋼 $\phi 32\text{mm}$ を拘束鋼材とし、付着を除去した中央 300mm の区間にひび割れが発生する材齢および拘束鉄筋のひずみを測定した。コンクリート打込み後、封緘状態に保ち材齢 7 日に脱型した。脱型後の供試体の 2 側面をアルミ箔粘着テープで封緘し、 $20^\circ\text{C}60\%\text{RH}$ の恒温恒湿室にてひび割れ発生まで測定を行った。

3. ひび割れ抵抗性の評価

3.1 温度ひび割れ抵抗性

(1) 圧縮強度の試験結果

圧縮強度の試験結果とその近似式を併せて図-2 に示す。セメント単体配合である FA 置換率 0% - BS 置換率 0% に対する混和材を混入した配合の圧縮強度比は、材齢 3 日で約 60%，材齢 7 日で約 70% と小さかった。しかしながら、材齢の経過に伴ってその差は小さくなり、材齢 91 日における強度比は、FA 置換率 20% - BS 置換率 20% で 98%，FA 置換率 10% - BS 置換率 30% で 104%，FA 置換率 0% - BS 置換率 40% で 106% となっており、ほぼ同等の強度が得られた。

また、FA 置換率 0% - BS 置換率 0% の材齢 28 日強度と同等の強度が得られる材齢は、FA 置換率 20% - BS 置換率 20% で材齢 58 日、FA 置換率 10% - BS 置換率 30% で材齢 39 日、FA 置換率 0% - BS 置換率 40% で材齢 37 日であった。

したがって、若材齢における強度発現が遅くなること、本論で検討しているローカーボンコンクリートの弱点ではあるが、中長期的には十分な強度が得られており、低発熱型のセメントを使用する場合に一般的に行われている管理材齢を 28 日から 56 日に延長する等の対策を採ることで、実用上の問題は少ないと考えられた。

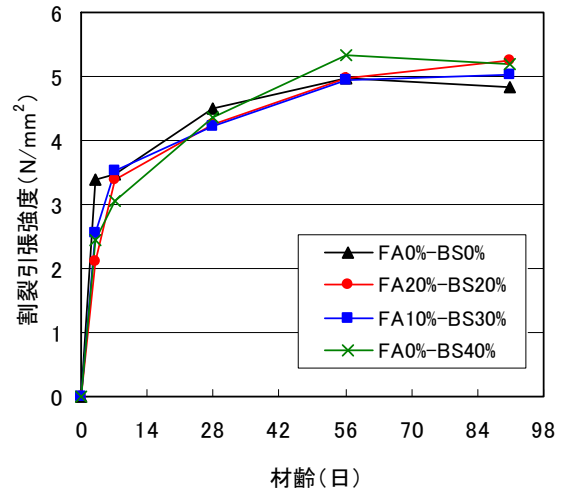


図-3 割裂引張強度の試験結果

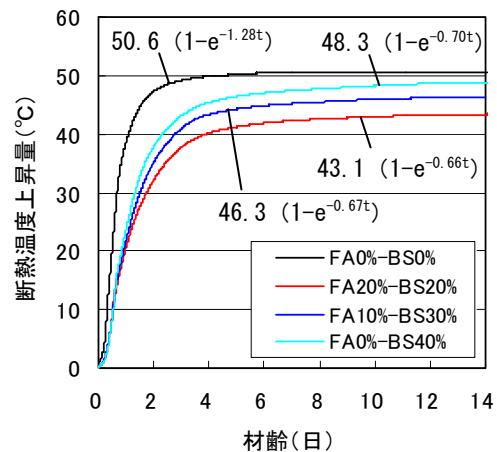


図-4 断熱温度上昇特性の試験結果

(2) 割裂引張強度の試験結果

割裂引張強度の試験結果を図-3 に示す。混和材を混入した配合は、材齢 3 日では FA 置換率 0% - BS 置換率 0% の 60~75% の強度しか得られていない。しかし、FA 置換率 20% - BS 置換率 20% および FA 置換率 10% - BS 置換率 30% は材齢 7 日に、FA 置換率 0% - BS 置換率 40% は材齢 28 日に、FA 置換率 0% - BS 置換率 0% と同等の強度が得られた。

(3) 断熱温度上昇特性の試験結果

断熱温度上昇特性の試験結果と土木学会コンクリート標準示方書設計編⁵⁾の断熱温度上昇式への近似式を併せて図-4 に示す。混和材でセメントを置換することで、終局断熱温度上昇量、温度上昇速度ともに低減した。その効果は、フライアッシュの置換割合の増加とともに大きくなり、FA 置換率 20% - BS 置換率 20% の終局断熱温度上昇量は、FA 置換率 0% - BS 置換率 0% より 7.5°C も低下した。

(4) 温度ひび割れ発生確率の試算

3次元 FEM 温度応力解析によって算出された温度ひび

割れ指数をひび割れ発生確率に換算⁵⁾して、温度ひび割れ抵抗性の評価を試みた。解析には、非線形温度応力解析プログラム ASTEA MACS Ver.6 を使用し、解析対象は、壁厚 1.0m、高さ 5.0m、延長 10.0m の壁部材とした。また、熱的、力学的物性値は表-4 に示すように設定し、

表-4 解析における熱的、力学的物性の設定値

物性値	単位	壁コンクリート
熱伝導率	W/m°C	2.7
比熱	kJ/kg°C	1.15
単位体積重量	kg/m ³	2,400
断熱温度上昇式	(基本式)	$Q(t) = Q(1 - \exp(-rt))$
	(Q)°C	試験結果
	(r)	試験結果
熱膨張係数	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	10
ポアソン比	-	0.2
圧縮強度	(N/mm ²)	試験結果
有効ヤング係数	N/mm ²	$E_e = \Phi(t) \times 4700 (f'_c(t))^{0.5}$ $\Phi(t < 3 \text{ 日}) = 0.73$ $\Phi(5 \text{ 日} \leq t) = 1.0$ $\Phi(3 \text{ 日} < t < 5 \text{ 日})$ 直線補間
引張強度	N/mm ²	試験結果

前述した(1)~(3)の試験結果も反映した。なお、ここでは、ひび割れ発生原因をできるだけ水和熱に起因した外部拘束応力のみ限定するために、自己収縮は考慮せず、外気温は 20°C 一定とし、さらに、底版の打設から十分に時間が経過した後に壁を打設することとして、底版コンクリートは、硬化が十分に進んだ非発熱体として扱った。

解析結果を表-5 に、各要素の最大温度および最小ひび割れ指数の分布図をそれぞれ図-5、図-6 に示す。最大温度は、FA 置換率 0% - BS 置換率 0% の 50.3°C に対し、FA 置換率 0% - BS 置換率 40% では 47.2°C、FA 置換率 10% - BS 置換率 30% では 45.6°C、FA 置換率 20% - BS 置換率 20% では 43.7°C に改善した。その結果、ひび割れ発生確率は FA 置換率 0% - BS 置換率 0% の 92% に対し、FA 置換率 0% - BS 置換率 40% では 68%、FA 置換率 10%

表-5 温度応力解析結果

配合	最大温度 (°C)	最大応力 (N/mm ²)	最小ひび割れ指数 (ひび割れ発生確率)
FA0% - BS0%	55.3	4.3	0.89 (92%)
FA20% - BS20%	43.7	2.6	1.42 (28%)
FA10% - BS30%	45.6	2.9	1.30 (45%)
FA0% - BS40%	47.2	3.1	1.14 (68%)

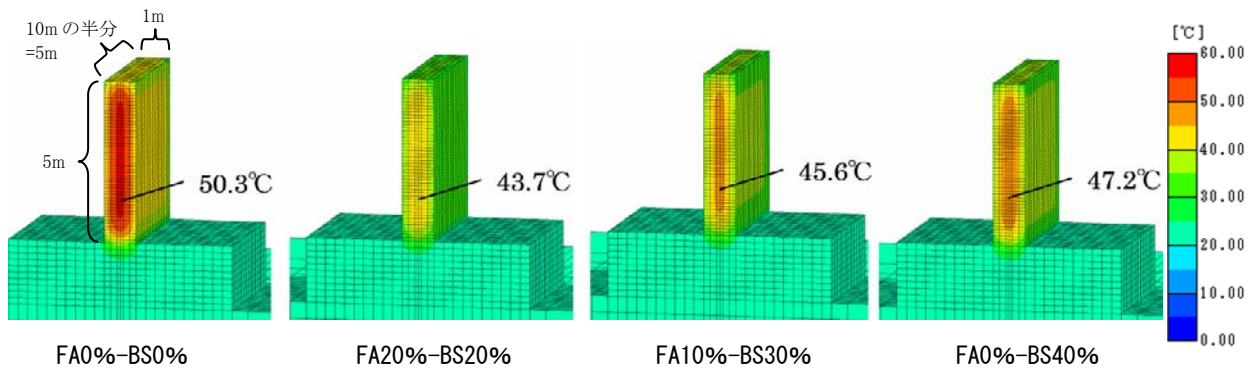


図-5 各要素の最大温度分布

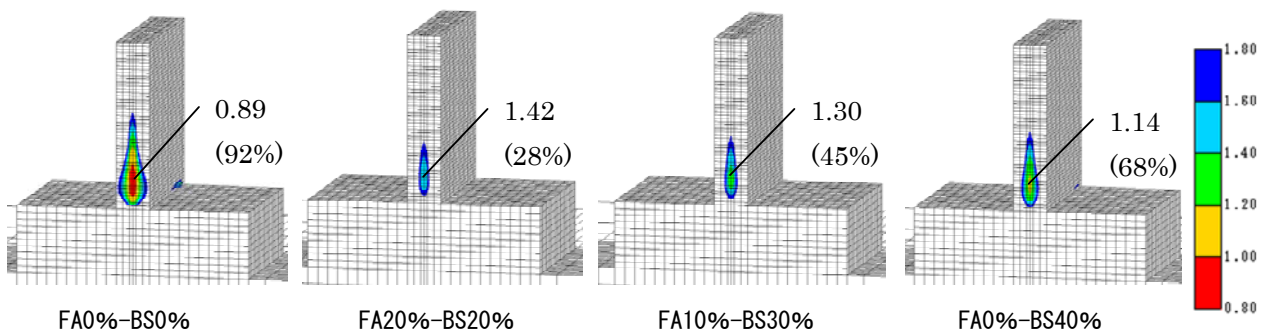


図-6 各要素の最小ひび割れ指数分布

表-6 収縮ひび割れ評価試験結果

配合		ひび割れ発生時					
		材齢 (日)		鉄筋 ひずみ ($\times 10^{-6}$)		コンクリートの 収縮拘束応力 (N/mm^2)	
FA0% -BS0%	No.1	15.8	20.5	-118	-135	2.06	2.35
	No.2	25.2		-151		2.64	
FA20% -BS20%	No.1	49.8	51.9	-188	-202	3.28	3.54
	No.2	54.0		-217		3.80	
FA10% -BS30%	No.1	35.0	38.6	-172	-175	3.00	3.07
	No.2	42.1		-179		3.13	
FA0% -BS40%	No.1	27.0	32.8	-152	-159	2.65	2.78
	No.2	38.5		-166		2.90	

-BS 置換率 30%では 45%, FA 置換率 20%-BS 置換率 20%では 28%と大幅に改善した。したがって、温度ひび割れ抵抗性は FA 置換率 20%-BS 置換率 20%が最も優れていると評価できた。

3.2 収縮ひび割れ抵抗性

収縮ひび割れ評価試験の結果を表-6, 図-7 に示す。ひび割れ発生材齢は、セメント単体配合である FA 置換率 0%-BS 置換率 0%では 20.5 日であったが、混和材を混入した配合のひび割れ発生材齢は遅くなった。その効果はフライアッシュの置換率の増加に伴って大きくなり、FA 置換率 0%-BS 置換率 40%は 32.8 日, FA 置換率 10%-BS 置換率 30%は 38.6 日, FA 置換率 20%-BS 置換率 20%は 51.9 日となった。

また、高炉スラグ微粉末の混入により、コンクリートの乾燥収縮や自己収縮といった収縮ひずみが増大すること⁶⁾が知られている。しかしながら、FA 置換率 0%-BS 置換率 0%でひび割れが発生した材齢 20.5 日における拘束鋼材のひずみは、FA 置換率 0%-BS 置換率 0%の -138.5 μ に対し、FA 置換率 20%-BS 置換率 20%は -136.8 μ , FA 置換率 10%-BS 置換率 30%は -137.0 μ , FA 置換率 0%-BS 置換率 40%は -137.8 μ であり、セメント単体配合より低減した。

この理由として、本試験に用いたコンクリートは、前述した表-3 で示したように、混和材の混入により単位水量を低減することができたためであると考えられた。具体的には、FA 置換率 0%-BS 置換率 0%の 140kg/m³ に対し、FA 置換率 0%-BS 置換率 40%では 133kg/m³, FA 置換率 10%-BS 置換率 30%では 131kg/m³, FA 置換率 20%-BS 置換率 20%では 129kg/m³ と減少しており、収縮ひび割れの発生材齢もこの順番で遅くなっていた。

一方で、収縮ひずみの低減率は 1%程度であることから、この他にもひび割れ発生材齢が延長した要因があると考えられた。本実験結果からは確認できなかったが、

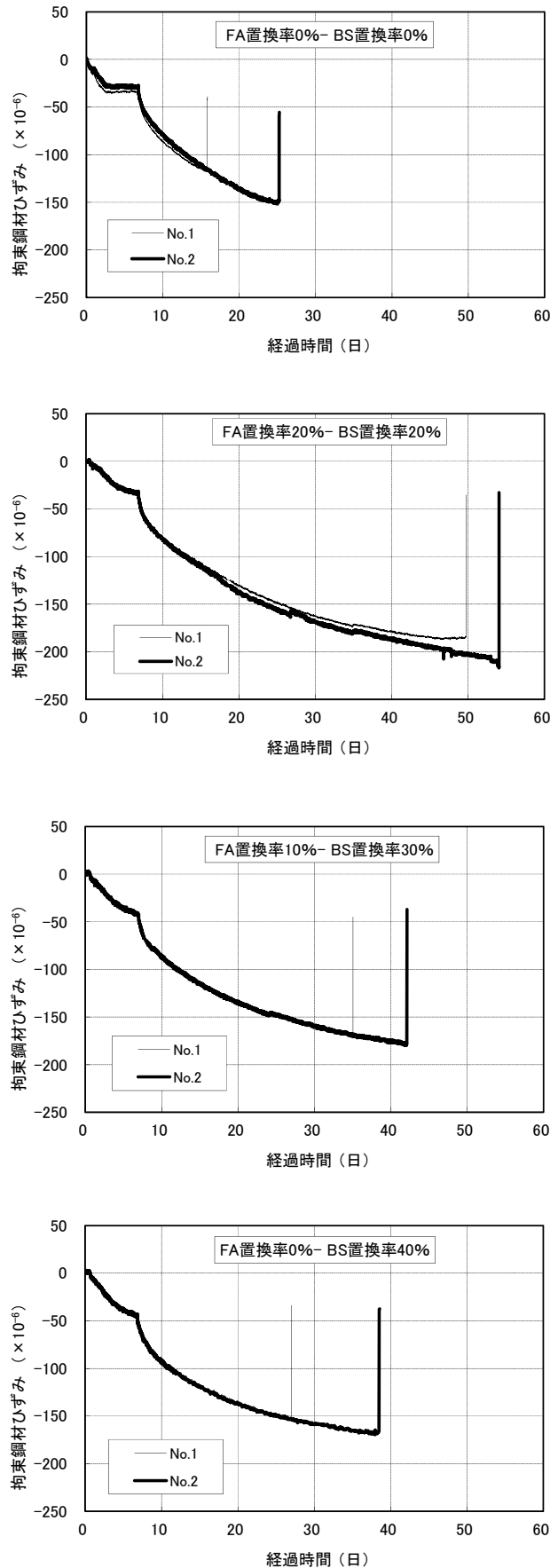


図-7 収縮ひび割れ評価試験結果 (拘束鋼材ひずみ)

混和材を混入したことで、コンクリートが緻密になり内部の微細欠陥が低減し、乾燥収縮や自己収縮などの比較的緩慢に生じる収縮変形に対する抵抗性が高まった可能性がある。このことを具体的に確認するためには、組織構造の緻密化による引張特性の変化を評価する必要があると考えられることから、今後の検討課題とする。

4. 結論

普通ポルトランドセメントの質量の40%をフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末で置換したローカーボンコンクリートの特性について、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末によるセメントの置換割合に相違を設けて実験を行い、ひび割れ抵抗性の観点から評価した。本検討の範囲内で、次のことがわかった。

- (1) 水結合材比を一定とした条件下で、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末によってセメントを置換すると、セメント単体の配合よりも若材齢強度は低下するものの、中長期的には同等以上の強度が得られる。
- (2) フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末によるセメントの置換により、終局断熱温度上昇量および温度上昇速度を低減できるため、温度ひび割れ抵抗性が向上する。また、高炉スラグ微粉末よりもフライアッシュの方が、断熱温度上昇特性の改善効果が高いことから、FA置換率20%－BS置換率20%の組合せの温度ひび割れ抵抗性が最も高い。
- (3) フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末によるセメントの置換により、同一スランプを得るための単位水量を低減できるため、収縮ひび割れ抵抗性が向上する。また、単位水量の低減効果は、高炉スラグ微

粉末よりもフライアッシュの方が高い。そのため、FA置換率20%－BS置換率20%の組合せの収縮ひび割れ抵抗性が最も高い。

以上のことより、普通ポルトランドセメントをFA置換率20%－BS置換率20%の組合せで置換したローカーボンコンクリートは、CO₂排出量の約45%削減⁷⁾と、ひび割れ抵抗性の大幅な向上を両立できるバランスの良い組合せであることがわかった。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：特集 / CO₂削減に向けて、コンクリート工学誌，Vol.48，No.9，pp.8-15，2010.9
- 2) 大澤友広，平田隆祥，二戸信和，仁見尚：種々の混和材を高置換したセメント系混合材料の基礎物性とCO₂削減効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.179-184，2010
- 3) 例えば，松家武樹，鈴木康範，堺孝司，福留和人：フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートに関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，No.64，pp.295-302，2010
- 4) 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，2010.9
- 5) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2008.3
- 6) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー86，1996.6
- 7) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)，コンクリートライブラリー125，2005.11