

加圧流動床灰およびフライアッシュを混入したコンクリートの収縮に関する一考察

広島大学大学院工学研究科 学生会員 ○田中 雅章
 中国電力技術研究センター 正会員 中下 明文
 広島大学大学院工学研究科 正会員 丸山 一平
 広島大学大学院工学研究科 フェロー会員 佐藤 良一

1. はじめに

加圧流動床形式の石炭火力発電所から排出される加圧流動床灰（PFBC 灰）は CaO および SO_3 が多く、 SiO_2 は少ないことが特徴である。PFBC 灰混入コンクリートの収縮に関して、灰無置換と比較し自己収縮は低減されるが、乾燥収縮は若干大きくなることが指摘されている。本研究では、普通コンクリート、PFBC 灰およびフライアッシュ二種（FA）を用いたコンクリートの自由ひずみおよび鉄筋拘束応力を測定し比較検討した。また、拘束応力ではクリープの重ね合わせの原理に基づく Step-by-step 法¹⁾を用いた解析結果と比較することによりひび割れ発生の有無を確認するとともに、見かけの有効ヤング係数¹⁾からクリープ変形の予測を試みた。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

表-1 に使用したセメントの鉱物組成を、表-2 に PFBC 灰および FA の化学成分を示す。コンクリートの配合を表-3 に示す。水結合材比（W/B）を 45%とし、普通コンクリート（記号 P0）、PFBC 灰 30%および 50% 混入コンクリート（記号 P30、P50）、FA30%混入コンクリート（記号 F30）の 4 水準を設定した。

2.2 養生方法

打込み後 15 時間後に脱枠し、直ちにアルミ箔粘着テープを用いて供試体をシールした。材齢 7 日以降、シールをはがし気中養生した。なお、環境条件は P0、P30 および P50 の場合、平均温度 19.9℃、平均湿度 47%、F30 では平均温度 19.8℃、平均湿度 39%であった。

2.3 実験項目および測定方法

(1) 長さ変化 低弾性型埋込型ひずみゲージを用いて、コンクリート供試体（100×100×400mm）の長さ変化を測定した。

(2) 鉄筋拘束応力 鉄筋の拘束応力は「コンクリートの自己収縮応力試験方法（案）」（100×100×900mm）に準拠した試験方法¹⁾で測定を行った。拘束用の鉄筋は D19（SD295A）で拘束鉄筋比は 2.8%とした。

3. 結果および考察

3.1 自由収縮ひずみ

図-1 に収縮ひずみの経時変化を示す。材齢 7 日までの自己収縮ひずみは、無置換（P0）の -71×10^{-6} に対して PFBC 灰 30%（P30）は -39×10^{-6} となり 44%の自己収縮の低減が見られた。また、同条件における P50 の自己収縮ひずみは -27×10^{-6} であることから、PFBC 灰置換率が増加するにつれて自己収縮ひずみが低減されることが明らかとなった。あわせて、FA30%（F30）の自己収縮ひずみは -30×10^{-6} となり P30 より若干小さくなった。PFBC 灰は SO_3 を多く含有しエトリンガイトを多く生成するため、FA 置換の場合と比較し自己収縮は低

表-1 普通ポルトランドセメントの鉱物組成

種類	化学成分(%)			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
OPC(1)	61.8	12.6	8.6	9.0
OPC(2)	50.1	23.5	9.4	8.9

注) (1) : P0,P30,P50 用 (2)F30 用

表-2 PFBC 灰およびフライアッシュの化学成分

種類	化学成分(%)			
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	SO_3
PFBC 灰	42.40	12.60	24.10	5.71
フライアッシュ (JIS)	64.60 (≥ 45)	25.00	1.10	0.30

記号) (JIS) : フライアッシュ JIS 規格 (二種 JIS A 6021)

表-3 コンクリートの配合

記号	単位量(kg/m^3)					
	W	C	P	F	S	G
P0	165	367	—	—	792	989
P30	165	257	110	—	773	989
P50	165	184	184	—	749	989
F30	165	257	—	110	749	989

記号) $B=C+P+F$: 結合材

キーワード 加圧流動床灰，フライアッシュ，混和材料，収縮，鉄筋拘束応力

連絡先 〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1 広島大学大学院工学研究科構造材料工学研究室 TEL 082-424-7786

減されるものと考えられたが、実際には細孔構造や水分移動の影響のほうが大きいことを示している。材齢 110 日における乾燥後の収縮ひずみは P0 (-570×10^{-6}) と比較し P30 では 9%, P50 では 10% の減少が見られた。一方, F30 では P0 と比較し 9% の収縮ひずみの増加が見られた。2.2 で述べたように湿度の影響が考えられるが、乾燥収縮ひずみは PFBC 灰置換の場合と比較し FA 置換のほうが大きいことが考えられる。

3.2 拘束応力

鉄筋拘束応力の経時変化を図-2 に示す。材齢 7 日までの自己収縮応力は, P0 の 0.28 N/mm^2 に対して P30 は 0.20 N/mm^2 , P50 は 0.11 N/mm^2 となり, PFBC 灰置換率の増加により自己収縮応力は低減された。同条件における F30 の自己収縮応力は 0.09 N/mm^2 であり, P0 と比較し 69% の低減となっている。材齢 110 日における乾燥後の収縮応力は P0 (2.24 N/mm^2) と比較し P30 では 5%, P50 では 12% の減少が見られた。一方, F30 では P0 と比較し 14% の収縮応力の低減が見られ, 自由収縮ひずみの場合と異なる傾向を示した。ここで実測の自由収縮ひずみを入力データとし, Step-by-step 法により収縮応力を求め比較した。なお, クリープ係数に関しては Ito²⁾らが応力解析に用いた値を使用した。P0, P30 および P50 の解析値はおおむね実測値を表現している。一方, F30 においては材齢 30~40 日から実測値と大きな差が生じたが, これは微細ひび割れの発生が原因と考えられる。図-3 に乾燥後の拘束応力と自由収縮ひずみとの差から求めた拘束ひずみの関係を示す。F30 において拘束ひずみがおおむね 110×10^{-6} 以上から拘束応力との線形関係が保持されていない。なお, 拘束ひずみ 110×10^{-6} における材齢は 35 日であり, 解析結果から予測されるひび割れ発生時期と一致した。また, 変動応力下の弾性ひずみとクリープ変形を含んだ見かけの有効ヤング係数を図-3 のように求めた。見かけの有効ヤング係数は, P0 の 18.3 kN/mm^2 に対して P30 および P50 は 15.3 kN/mm^2 , F30 は 12.3 kN/mm^2 となった。表-4 のように見かけの有効ヤング係数を材齢 7 日の圧縮供試体のヤング係数で除した値は, P0 および P50 は約 0.55 と同等となった。一方, P30 および F30 は 0.45 と小さくなっていることから, P0 および P50 と比較しクリープ変形が大きいことが予測される。

4. まとめ

- (1) 材齢 7 日までの自己収縮ひずみおよび自己収縮応力は, 同一灰置換率において PFBC 灰置換に比べ FA 置換のほうが減少する。材齢 110 日における乾燥後の収縮ひずみは, 無置換と比較し PFBC 灰置換は若干減少するが, FA 置換では増加し, 鉄筋拘束下で材齢 30~40 日で微細ひび割れ発生の可能性を示した。
- (2) PFBC 灰および FA 灰置換率 30% では, 無置換に比べクリープ変形が大きいことが予測された。

参考文献

- 1) 社団法人 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書, 1996 および 2002
- 2) Hidetoshi Ito, Ippei Maruyama, Makoto Tanimura, Ryoichi Sato: Early Age Deformation and Resultant Induced Stress in Expansive High Strength Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2, No.2, pp.155-174, 2004

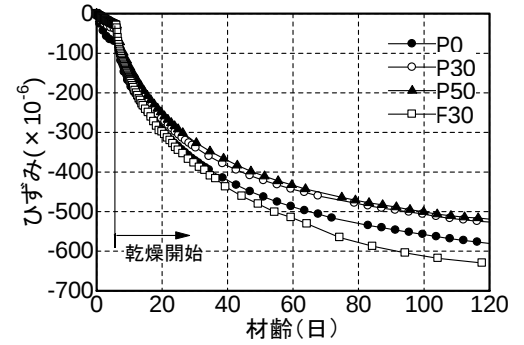


図-1 自由収縮ひずみ

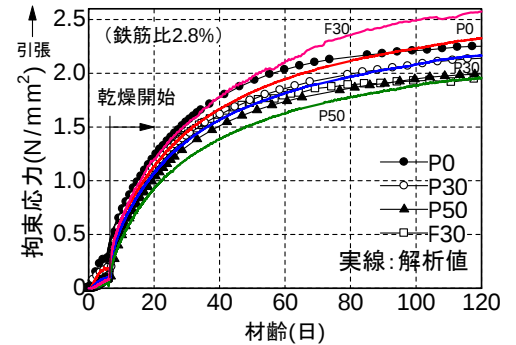


図-2 鉄筋拘束応力と解析結果

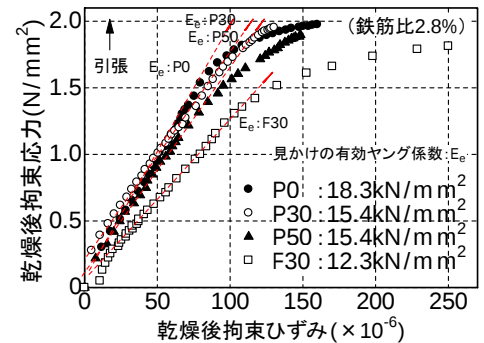


図-3 乾燥後の拘束応力と拘束ひずみの関係

表-4 コンクリートヤング係数比 (E_e/E_7)

記号	$E_e(\text{kN/mm}^2)$	$E_7(\text{kN/mm}^2)$	E_e/E_7
P0	18.3	34.0	0.54
P30	15.4	33.9	0.45
P50	15.4	27.5	0.56
F30	12.3	27.5	0.45

注) E_7 : 材齢 7 日ヤング係数 (圧縮供試体)