

論文 フライアッシュを多量使用した硬化体の力学的性質に及ぼす刺激剤の効果

松本 高明^{*1}・河合 研至^{*2}・佐藤 良一^{*3}・土田 茂^{*4}

要旨：石炭火力発電所の産業副産物であるフライアッシュはポゾラン反応性を有する混和材として以前からコンクリート構造物に用いられているが、反応性が低いために多量使用は現段階では困難である。本研究はフライアッシュを多量使用し、ポゾラン反応を活性化させるために刺激剤を添加した硬化体の力学的な性質に関する基礎データを得ることを目的とし、強度試験、乾燥収縮試験、拘束試験を行い、フライアッシュ多量使用時の刺激剤の影響について実験的検討を行った。

キーワード：フライアッシュ、刺激剤、強度、収縮、クリープ

1. はじめに

近年、石油の代替エネルギーとして石炭が重要となってきており、エネルギー資源としての安定供給や経済性の観点から、石炭火力発電所は今後も増設されていくものと考えられている。これにより、排出される石炭灰は将来も増加することが予想されており、フライアッシュの有効利用の観点からコンクリートへの多量使用が望まれている。

フライアッシュは以前からポゾラン反応性を有する混和材として知られており、長期強度の増加、水密性の向上、低発熱、流動性の向上などに寄与することからコンクリート構造物に用いられてきた。しかしフライアッシュの多量使用には、ポゾラン反応による中性化やまた、反応性が低いために強度が低下するといった問題があり、フライアッシュの多量使用は現段階では困難である。一方、筆者らは既往の研究¹⁾において、ポゾラン反応の過程で細孔溶液中のアルカリが減少することを明らかとし、ポゾラン反応がアルカリの刺激によって進行していることが示唆された。フライアッシュを多量使用し

た場合、ポゾラン反応に必要な水酸化カルシウムが絶対的に不足することとなるが、刺激剤として水酸化アルカリを添加することによりアルカリ分の不足を補い、かつポゾラン反応をより活性化させることが考えられる。

本研究はフライアッシュを多量使用し、ポゾラン反応を活性化させるために刺激剤を添加した硬化体の力学的性質に関する基礎データを得ることを目的とし、強度試験、乾燥収縮試験、拘束試験を行い、フライアッシュ多量使用時の刺激剤の影響について実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

セメント (C) には普通ポルトランドセメント (比表面積: 3380cm²/g)、フライアッシュ (FA) にはブレアソール炭の細粉 (密度: 2.27g/cm³, 比表面積: 3830cm²/g) を使用した。骨材には、細骨材として風化花崗岩系山砂 (表乾密度: 2.55g/cm³, 吸水率: 1.61%, 粗粒率: 2.91)、粗骨材として流紋岩質砕石 (表乾密度: 2.68g/cm³, 吸水率: 0.81%) を使用した。混和剤 (Ad) には

*1 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻 (正会員)

*2 広島大学助教授 工学部第四類 工博 (正会員)

*3 広島大学教授 工学部第四類 工博 (正会員)

*4 電源開発株式会社 茅ヶ崎研究センター

表-1 硬化体の配合要因

配合名	W/B (%)	質量比率				Al	Ad		
		W	C	FA	LP				
PL	45	0.45	1	-	-	-	SP1		
F30			0.7	0.3	-	-	SP1		
F30-K							K	SP1	
F60							-	SP1	
F60-Na							Na	SP2	
F60-K							K	SP2	
F60-LP						0.3	-	SP2	
F60-K-LP							K	SP2	
F90-K-LP					0.1	0.9	0.45	K	SP2

ポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤 (SP1), ナフタリンスルホン酸系高性能減水剤 (SP2), フライアッシュ用 AE 剤を使用した。ポゾラン反応を活性化させる刺激剤 (Al) として、水酸化カリウム (K) あるいは水酸化ナトリウム (Na) を使用した。また、フライアッシュを多量使用した場合には長期材齢においてカルシウムイオンが不足することが予想され、長期材齢でのカルシウムイオンの不足を補いポゾラン反応の進行が可能か否かを検討するために石灰石微粉末 (LP, 密度: 2.71 g/cm³, 比表面積 8130 cm²/g) を使用した。

硬化体の配合要因を表-1 に示す。刺激剤添加の場合、練り混ぜ水をそれぞれの水酸化アルカリの 0.5N 溶液とすることにより添加し、石灰石微粉末はフライアッシュ質量の半分を外割で添加した。モルタルの場合には細骨材を質量比で結合材の 2 倍混入した。コンクリートの配合は細骨材率 45.3%, 単位水量 166kg/m³ を一定としスランプ 10cm, 空気量 4.0% が得られるように混和剤の種類および使用量で調整した。

2.2 試験項目

2.2.1 強度試験

供試体はモルタル (角柱供試体: 40×40×160mm) とし、材齢 2 日で脱型し、その間湿布養生、脱型後は所定の材齢まで水中養生を行った。材齢 7, 28, 91 日においてモルタルの曲げ強さ試験及び圧縮強さ試験を行った。

単位:mm

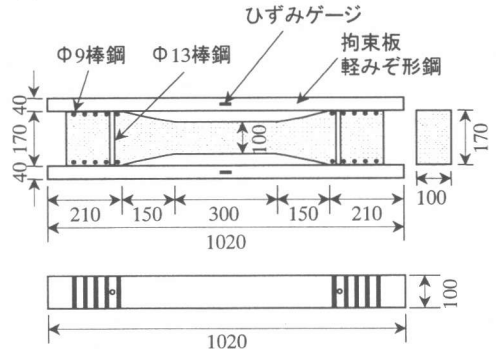


図-1 型枠拘束供試体

2.2.2 乾燥収縮試験

供試体はペースト (角柱供試体: 40×40×160mm) 及びコンクリート (角柱供試体: 100×100×400mm) とし、材齢 2 日で脱型した。材齢 7 日までは湿布養生を行い、材齢 7 日から乾燥を開始して長さ変化及び質量変化を測定した。長さ変化はコンタクトゲージにより、標点距離をペーストでは 100mm, コンクリートでは 300mm で測定した。

2.2.3 型枠拘束試験

(1) 拘束試験

JIS 原案「コンクリートのひび割れ試験方法 (案)」²⁾ に準じて行った。型枠拘束供試体を図-1 に示す。供試体は各要因 2 体ずつ作製し、材齢 7 日まで湿布養生を行った後脱型し、乾燥を開始した。拘束枠のひずみは拘束枠の重心位置にひずみゲージを貼り付け測定し、コンクリートのひずみはコンタクトゲージ (標点距離: 300mm) により測定した。なお、自由収縮ひずみは乾燥収縮試験に用いた供試体の収縮ひずみ測定で代用した。

(2) 強度試験

圧縮強度, 静弾性係数試験 (φ100×200mm), 割裂引張強度試験 (φ150×300mm) を行った。試験は 7 日 (乾燥開始材齢), 28 日及び拘束試験体にひび割れが発生した材齢 (2 体のうちひび割れ発生が遅い方の材齢) において実施した。

3. 実験結果及び考察

3.1 モルタル強度試験

図-2 にモルタルの圧縮強度及び曲げ強度の経時変化を示す。フライアッシュ置換率が増加するにしたがい強度が低くなっている。フライアッシュ置換率 60%では刺激剤の有無に関わらずそれほど違いはないが、フライアッシュ置換率 30%では刺激剤を入れた場合、強度の低下が見られる。この原因としては、練り混ぜ水を 0.5N の高濃度のアルカリ溶液としたため細孔溶液中の OH⁻濃度が非常に高くなり、セメントからの Ca²⁺の溶出が抑制されるといったセメントの水和を遅延する作用が働いたことや、水中養生中のアルカリの溶出により刺激剤の効果が小さくなったことが考えられた。しかし、別途行った、同一養生条件下の試料を用いた細孔径分布試験では、刺激剤を添加すると刺激剤を添加しない場合より細孔構造は緻密となる結果を得ており、セメントの水和の抑制やアルカリの溶出といった影響は小さく刺激剤が強度に寄与していない理由は他に原因があるものと思われる。また石灰石微粉末を混入した場合、強度が増加しており、石灰石微粉末を外割で添加していることによる粉体量の増加や、初期材齢におけるセメントの水和の促進³⁾などが考えられる。これらは初期材齢で強度増加が見られるが長期ではその影響が少なくなるとされているが、本実験では長期材齢になるほど強度増進効果が見られ、炭酸カルシウムがセメントの水和だけでなく、フライアッシュのポゾラン反応にも関与していることが考えられる。

ポゾラン反応進行による強度増進を見るため各配合の材齢 28 日を基準とした強度比を図-3 に示す。材齢 28 日以前ではフライアッシュを置換しない場合に比べて全ての配合において強度の伸びが大きくポゾラン反応が進行していることが伺えるが、材齢 28 日以降になると、置換率 90%に関しては傾きが小さくポゾラン反応が停滞していることが考えられる。

3.2 乾燥収縮

ペーストの乾燥収縮の経時変化を図-4 に、乾燥収縮と質量変化の関係を図-5 に示す。乾燥収縮と質量変化の関係が示すように、置換率が大きくなるに伴い同一の質量減少率に対するひずみが小さくなっていることから、置換率が大きいほど収縮に関与しない比較的大きな空隙が多いことが推測される。また、収縮を起こさない水が乾燥により失われ、その後収縮を起こす水

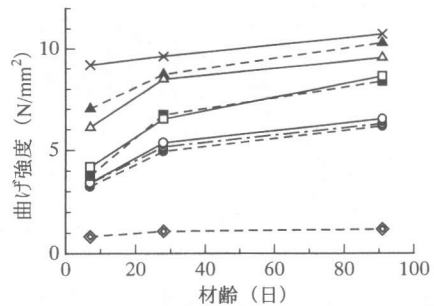
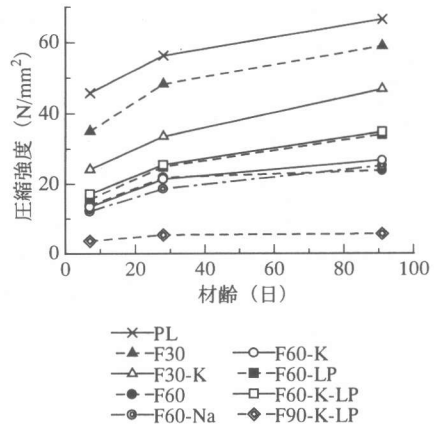


図-2 圧縮強度及び曲げ強度

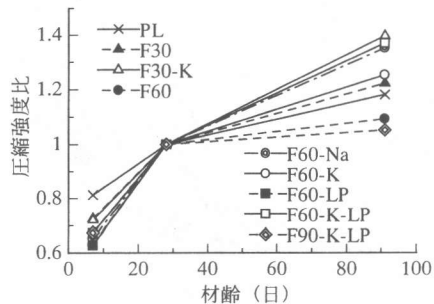


図-3 圧縮強度比

の乾燥が開始すると、置換率、刺激剤の有無に関係なく、質量減少率の増加に対するひずみの増加はほぼ同一となっている。従って、乾燥により収縮を引き起こす比較的小さな空隙は配合に関係なくほぼ同量であることが予想される。

刺激剤を混入した場合、同一の置換率で比較すると刺激剤を混入しない場合に比べ収縮が大きくなっている。一般的にフライアッシュを混入すると収縮成分であるセメントペーストの割合が減少するため収縮が小さくなるが、刺激剤の添加によりポゾラン反応が進行し、細孔構造が緻密になったことが収縮の増大した一因と思われる。F30-Kのペーストにおいては材齢10日（乾燥開始から3日）ほどで、供試体表面にひび割れが発生したことにより収縮が小さくなっており、また、他の配合に比べ、長期にわたってひずみが増加し続けている。

フライアッシュ置換率60%の石灰石微粉末を混入した場合においては、図-4のように石灰石

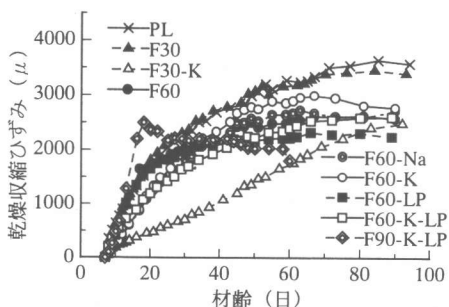


図-4 乾燥収縮の経時変化（ペースト）

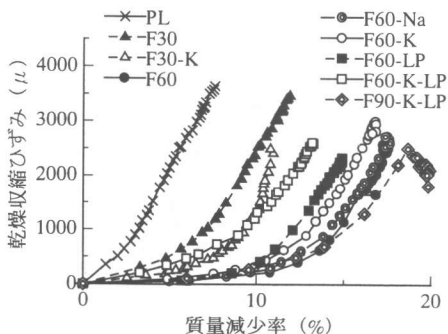


図-5 乾燥収縮と質量変化の関係（ペースト）

微粉末を混入しない場合に比べ若干乾燥収縮が減少する。しかし、図-5を見ると、同じ質量減少率に対しては収縮が大きくなっている。これは、石灰石微粉末を外割で添加しているために硬化体中の粉体量が増加し、硬化体に占める水の割合が減少するが、細孔構造は緻密になったためと思われる。F90-K-LPの初期材齢に収縮が非常に大きいのは、強度、弾性係数が非常に小さいためわずかな毛細管張力で大きな変形が生じ、収縮が非常に大きくなっていると思われる。

コンクリートの乾燥収縮の経時変化を図-6に、乾燥収縮と質量変化の関係を図-7に示す。経時変化を見るとF30-Kがペーストと比較して大きくなっている。図-4のペーストの収縮では供試体表面にひび割れが発生したため収縮が小さかったが、コンクリートではフライアッシュを混入しない場合よりも収縮が大きい。F30-K

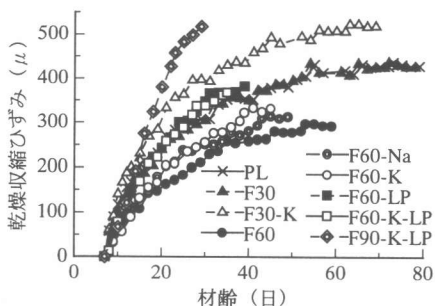


図-6 乾燥収縮の経時変化（コンクリート）

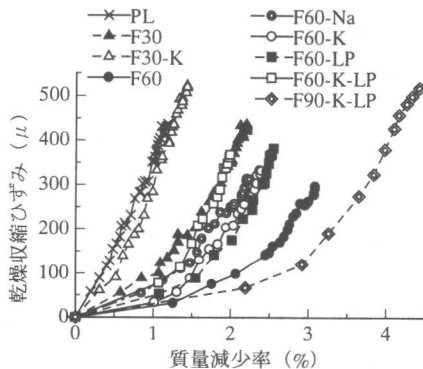


図-7 乾燥収縮と質量変化の関係（コンクリート）

のペーストもコンクリートと同じように本来は収縮が大きいと考えると、乾燥により硬化体表面から内部へと徐々に水が失われるとき、表面と内部のひずみに差が生じ、それによりひび割れが発生したと思われる。

3.3 拘束試験

図-8にコンクリートの圧縮強度、割裂引張強度および弾性係数の経時変化を示す。乾燥によりセメントの水和やポゾラン反応が進行しにくく強度増進はそれほど見られない。また、フライアッシュ置換率90%の弾性係数が極端に低くなっている。

コンクリートに作用する拘束応力(σ_c)を以下の式により求めた。

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

ここに、 ε_s : 拘束枠のひずみ

E_s : 拘束枠の弾性係数 (200kN/mm²)

A_s : 拘束枠の断面積 (793.2mm²)

A_c : コンクリートの断面積
(10000mm²)

図-9に拘束応力の経時変化を示す。フライア

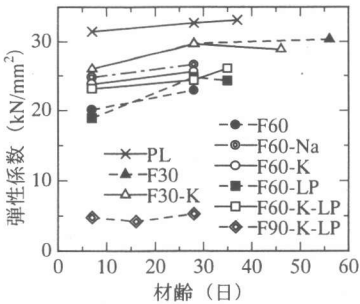
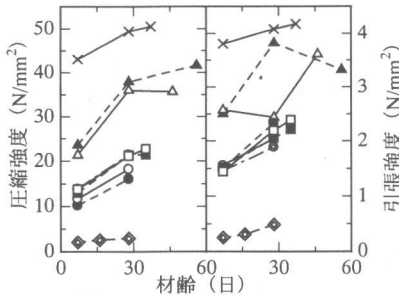


図-8 圧縮強度，引張強度，弾性係数の経時変化

ッシュ置換率が大きくなるしたが拘束応力が小さくなっており、これは図-6の乾燥収縮の大小とほぼ同じ傾向を示している。フライアッシュを置換した場合には刺激剤の有無により拘束応力に大きな違いは見られない。しかし、自由収縮(乾燥収縮)では刺激剤を混入した場合の方が大きくなっている。図-10に示すように拘束応力と拘束引張ひずみ(自由収縮ひずみ-拘束収縮ひずみ)の関係では、刺激剤を添加した場合には弾性係数が小さくなっている。このため、刺激剤を添加すると収縮は大きくなるが、拘束応力は刺激剤を添加した場合と同程度になったものと思われる。F90-K-LPでは、自由収縮が大きい、弾性係数が小さいため拘束応力が小さくなる。

コンクリートのクリープひずみの経時変化を図-11に示す。クリープひずみ(ε_c)は以下の式により算出した。

$$\varepsilon_t = \varepsilon_c + \varepsilon_e \quad (2)$$

$$\varepsilon_c = \sigma_r / E_c \quad (3)$$

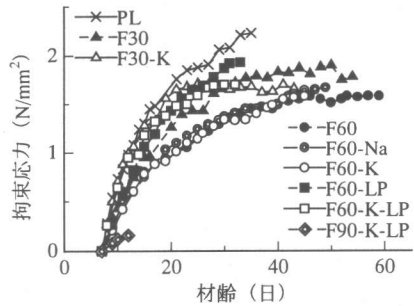


図-9 拘束応力の経時変化

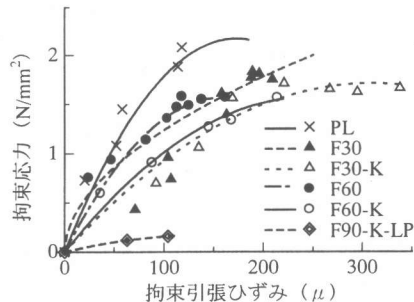


図-10 拘束応力と拘束引張ひずみの関係

ここに、 ε_t : コンクリートの拘束引張ひずみ
 ε_e : コンクリートの弾性ひずみ
 σ_r : 拘束応力
 E_c : コンクリートの弾性係数

コンクリートの弾性係数は材齢による変化が少なかったため、材齢 28 日の弾性係数を用いた。刺激剤を添加するとクリープひずみが大きくなる傾向がある。また石灰石微粉末を混入してもクリープひずみが大きくなっている。

コンクリートの引張伸び能力が大きいすなわち弾性係数が小さくクリープが大きいきひび割れは発生しにくい。そこで、図-12 にひび割れ発生材齢と拘束引張ひずみ及びクリープひずみの関係を示す。それぞれの配合においてひび割れ発生材齢が長くなると拘束引張ひずみ及びクリープひずみが大きくなる傾向がある。フライアッシュ置換率 60% の石灰石微粉末を混入していないもの (F60, F60-Na, F60-K) に関しては、それぞれ材齢 59 日, 49 日, 45 日の時点でまだひび割れが発生していない。図-11 のクリープひずみの経時変化を見ると、フライアッシュ置換率 60% の配合ではそれほどクリープひずみは大きくないが、図-6 の乾燥収縮も小さいため、まだひび割れが発生していないものと思われる。

4. 結論

フライアッシュを多量使用し、ポゾラン反応を活性化させるために水酸化アルカリを刺激剤として添加した硬化体に関して、強度試験、乾燥収縮試験、拘束試験を行い、フライアッシュ多量使用時の刺激剤の影響について実験的検討を行った。

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 刺激剤の添加による強度増加は見られなかったが、石灰石微粉末の混入により強度増加が見られた。
- (2) 刺激剤の添加により乾燥収縮が大きくなることが確認された。

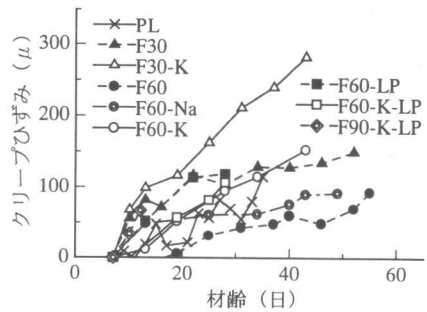


図-11 クリープひずみの経時変化

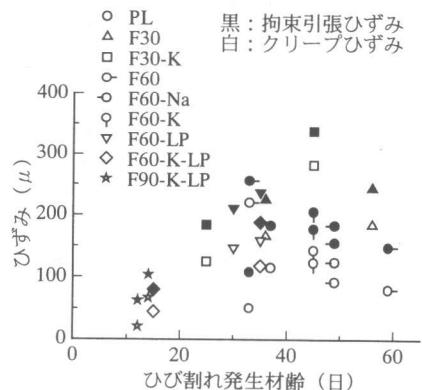


図-12 ひび割れ発生時の拘束引張ひずみとクリープひずみ

- (3) 刺激剤の添加によりクリープが大きくなる傾向がある。

参考文献

- 1) 河合研至, 佐藤良一, 松本高明, 土田茂: フライアッシュを多量使用したセメントペーストの水和特性, セメント・コンクリート論文集, pp.161~166, 2000
- 2) 川瀬清孝: コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法の標準化とその適用性に関する研究《その1》, セメント・コンクリート, No.532, pp.49~56, 1991.6
- 3) 坂井悦郎, 中川晃次, 三原敏夫, 大門正機: フィラーセメント, セメント協会編, わかりやすいセメント科学, セメント協会, pp.54~62, 1993