

ポゾラン反応がもたらす組織緻密化のメカニズムと強度発現に関する考察

(財) 電力中央研究所 正会員 ○山本 武志

(財) 電力中央研究所 正会員 金津 努

1. はじめに

フライアッシュを混和したコンクリートの若材齢における強度は低い、長期材齢においては強度が高まり、セメント単味のコンクリートと同程度以上の強度を示す。また、組織緻密化とともに強度発現が生じ、セメント単味の場合に比べて塩分浸透速度が低下するなど、コンクリートの耐久性を向上させる効果がもたらされることも知られているが、組織緻密化が生じるメカニズムに関する研究例は少ない。耐久性を高めることを目的としたコンクリートの製造にフライアッシュを用いるには、ポゾラン反応がもたらす組織緻密化のメカニズムを明らかにする必要がある。

2. 試験概要

普通ポルトランドセメントおよび JIS 規格 II 種相当 9 種類、IV 種相当 6 種類の合計 15 種類のフライアッシュを用い、JIS A 6201 に準拠したモルタル試験体を製造し、材齢 54 週までの活性度指数を求めた。また、各材齢におけるモルタルの細孔径分布測定、TG/DTA によるポルトランドイト (CH) 量の分析、および SEM 像観察を行った。

3. 試験結果および考察

(1) 活性度指数

フライアッシュを混和したモルタルの活性度指数は、材齢 27 週と 54 週の間においても増加傾向にあり、材齢 54 週においてもポゾラン反応が継続した (図 1)。また、材齢 54 週における活性度指数は、全てのフライアッシュ混和モルタルにおいて 100%以上となり、IV 種相当のフライアッシュを混和した場合でも長期材齢において十分な強度発現を期待できることが明らかになった。

(2) 細孔径分布

材齢 28 日と 54 週における細孔径分布の変化を図 2 に示す。なお、細孔径分布で増減が

顕著に認められた範囲を基に 3~10nm, 11~20nm, 21~110nm, 111nm~360 μ m の 4 種類の範囲における細孔率を指標とした。ポゾラン反応の進行に伴い、直径が 20nm 以下となる細孔は増加するが、直径が 21~110nm となる細孔が減少することが明らかになった。一方で、フライアッシュを混和しない場合は、セメントの水和反応の進行に伴い、20nm 以下、21~110nm の範囲の細孔率が共に減少し、C-S-H 等の水和物量の増加により細孔が充填されることを確認した。

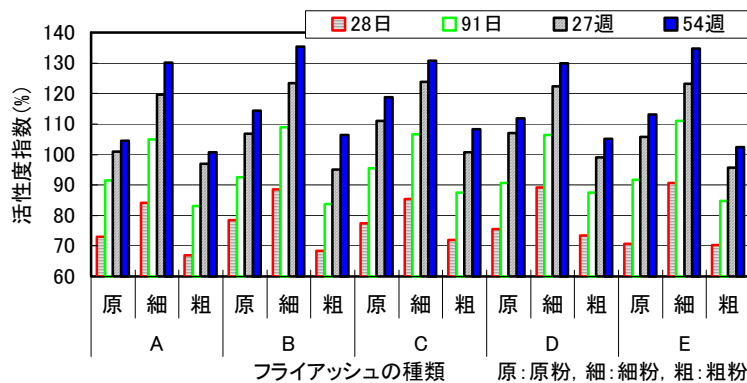


図1 活性度指数の変化

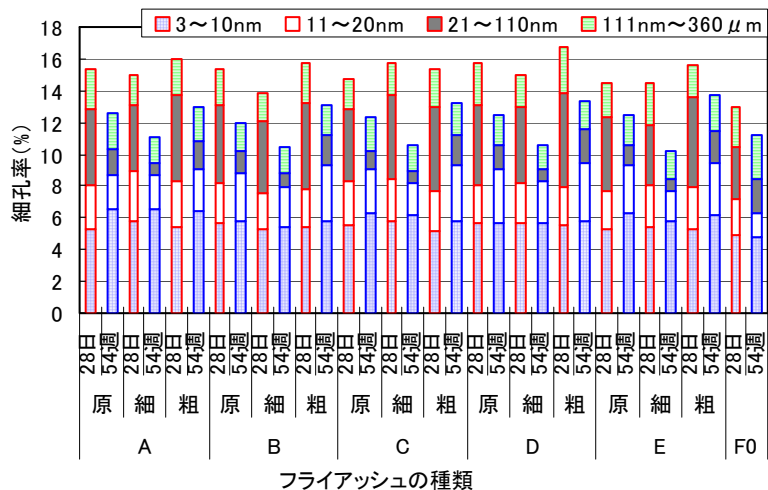


図2.細孔径分布の変化 F0: フライアッシュ無混和

キーワード フライアッシュ, ポゾラン反応, 緻密化, 強度発現, 細孔径

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (財) 電力中央研究所 TEL 04-7182-1181

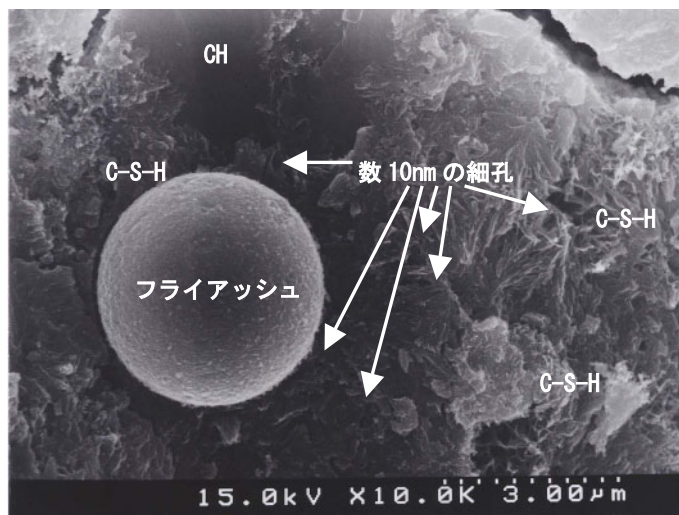


写真1 材齢 28 日における水和生成物の形態

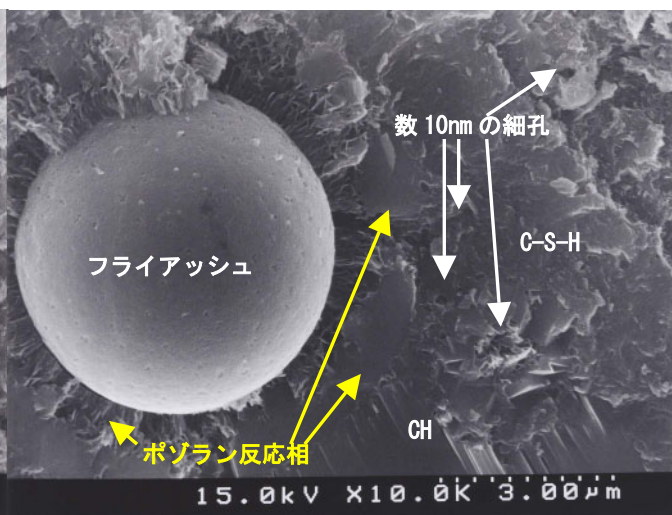


写真2 材齢 54 週における水和生成物の形態

(3) ポルトランドイト含有量

フライアッシュを混和した場合は、材齢 27～54 週において CH 含有量が減少に転じ、材齢 27 週以降にボゾラン反応が活発になることが明らかになった（図 3）。フライアッシュ A～E の細粒は原粉と粗粉に比べて CH 含有量は少なく、CH 含有量が少ないほど直径 21～110nm の細孔率が少なくなり（図 2）、同時に活性度指数が大きくなる（図 1）ことが明らかになった。

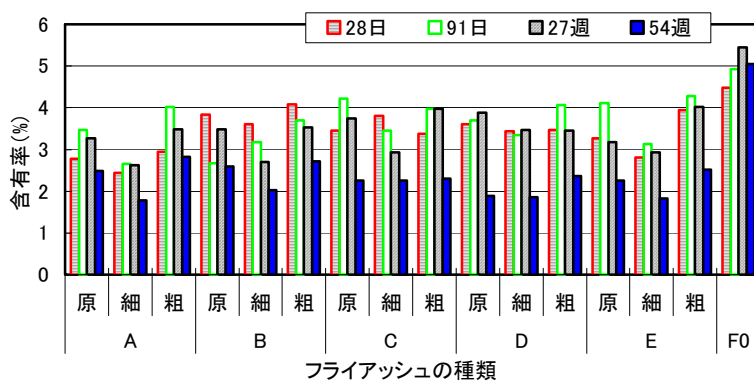


図3 CH含有量の変化

(4) SEM 像による細孔構造観察

フライアッシュを混和したモルタルは、材齢 28 日ではボゾラン反応相は形成されておらず、フライアッシュ粒子に付着するように C-S-H が放射状に生成した。そして、フライアッシュ粒子から離れた所に形成された C-S-H 相中とともにフライアッシュ粒子に接する C-S-H 相中に直径が数 10～数 100nm となる細孔が多く形成された（写真 1）。一方、材齢 54 週においては、フライアッシュ粒子の周囲に 1～2 μ m の厚さとなるボゾラン反応相（10～100nm の隙間幅を有し、絡まり合う板状結晶の層と細孔を持たない密な層）を形成し、フライアッシュ粒子から離れた所にのみ直径が数 10～数 100nm となる細孔が存在した。すなわち、フライアッシュ粒子の近傍に形成された練混ぜ余剰水の残留痕と考えられる数 10～数 100nm の細孔は、ボゾラン反応相の形成に伴う膨張力により周囲の C-S-H 相が押されて充填され、消失するが、ボゾラン反応相中に形成された 10～100nm の隙間幅を有する細孔が増加することが明らかとなり、図 2 に示す細孔径分布の変化と整合する結果になった。

4. まとめ

フライアッシュのボゾラン反応に伴う組織緻密化と強度発現は以下のメカニズムによると考えられた。

- ① 若材齢時にフライアッシュ粒子に付着生成する C-S-H 相中に練混ぜ余剰水の残留痕として直径数 10～数 100nm の細孔が形成されるが、材齢 27 週以降に活発になるボゾラン反応に伴い生成するボゾラン反応相の膨張力により C-S-H 相が押され、その空隙を充填する。この現象により、組織緻密化がもたらされる。
- ② ボゾラン反応相中には、隙間幅が 10～100nm となる細孔が多く形成されるが、その結晶を介してフライアッシュ粒子と周囲の C-S-H 相は密着する形態になるため、強度低下の要因とはならず、①に示す組織緻密化に伴う C-S-H 相間の分子間力と考えられる結合力が高まるために強度発現がもたらされる。