

フライアッシュの周囲に放射状に生成されたポゾラン反応相

## フライアッシュ混合コンクリートの利用拡大

セメント混合材としてのフライアッシュ

強度発現性を短時間で調べる

特殊条件下で利用できるコンクリートを開発

ひとこと 地球工学研究所 バックエンド研究センター 主任研究員 山本 武志

# セメント混合材としてのフライアッシュ

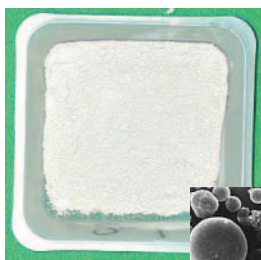
日本には多くの石炭火力発電所があり、電源別発電電力量では約24%（2004年度）を担っています。エネルギーセキュリティの確保、供給の安定性や経済性から、原子力発電に次ぐ発電施設として欠くことのできないものです。一方、石炭を燃やした後は大量の石炭灰が排出されるため、石炭灰を建材や道路材、肥料などに有効利用する方法がさまざまに検討されています。

電力中央研究所は石炭灰の多くを占めるフライアッシュを、セメントの混合材として利用するため、フライアッシュを混ぜたコンクリートの強度を短時間で調べる方法と、耐水性・耐熱性に優れた新しい高耐久性コンクリートの製造方法を開発しました。

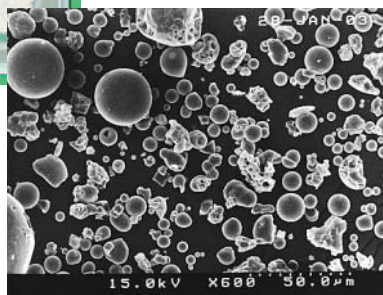
## 混合材としての特長

フライアッシュは石炭火力発電所の電気集塵機で回収された石炭灰の一種で、主な成分であるシリカとアルミのほかに、少量の鉄、マグネシウム、カルシウムを含んでいます。石炭灰は全国で年間、約800万トンが排出され、その約80%がセメントの原料に使われていますが、コンクリートの強度を増すための混合材として利用されるのは約80万トン、10%程度です。

フライアッシュを混ぜることで、コンクリートの劣化の原因の一つであるアルカリ骨材反応の抑制効果上がるほか、コンクリートの長期的な強度の増進、固化する際の水和熱（発熱）の抑制、および自己収縮率の減少によるひびわれの防止、コンクリート組織の緻密化、打設時の流動性の向上が発揮されます。



発電所からでた  
フライアッシュ



電子顕微鏡写真（球形の粒子がフライアッシュ）

図 フライアッシュの粒子

## フライアッシュの性状で強度が変化

セメントと水が反応し固まる水和反応の際に、フライアッシュが加わると、その成分の約70～80%を占めるシリカやアルミなどのガラス質が、セメント水和物（水酸化カルシウム）と長い時間をかけて化学反応を起こします。これを「ポゾラン反応」と呼び、この反応がコンクリートの強度を高めると言われていますが、その発現メカニズムは十分にわかっていません。

石炭は産地によってその成分が異なり、また、発電所での燃焼条件などによってフライアッシュの性状も変化するので、扱い方を誤ると強度の低いコンクリートになります。ポゾラン反応は打設後、3カ月ほどかけて進むため、現在は打設の際にサンプルを採って3カ月ほど放置してから圧縮強度試験などを行い、初期の設計強度を満たしているかどうか調べています。このため、構造物が完成した後でしか強度発現性が評価できず、今までに使ったことのあるフライアッシュしか混合材に使うことができません。

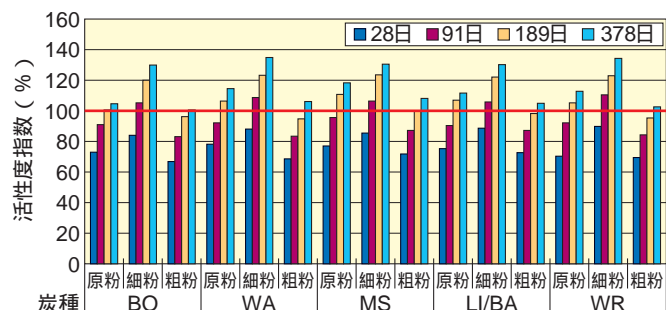


図 強度発現性の評価

JIS規格に定められた強度を100とすると、27～54週の間に十分な強度が発現する。

# 強度発現性を短時間で調べる

## ポゾラン反応を解明する

コンクリートの強度の決め手となるポゾラン反応を詳細に調べた結果、フライアッシュの粒子を取り囲むようにできる2層のポゾラン反応相が時間とともに成長し、セメントの練り混ぜ後にできる数十から数百ナノメートルの空隙（水隙）を充填していくこと、これにより水和反応生成物間の距離が縮まって接着力が高まり、コンクリートの強度を増大させることが明らかになりました。

解明した強度発現メカニズムに基づき、フライアッシュ混合コンクリートの強度発現性をコンクリートの打設前に評価する新しい手法、API法（Assesed Pozzolanic-activitu Index：促進化学試験法）の開発に取り組みました。

## 2日間で評価が可能に

API法は、ポゾラン反応の進み具合を評価する手法です。セメントとフライアッシュと水を混ぜた懸濁液中のカルシウムイオンの消費率を調べることで、ガラス質とセメント水和物の反応の具合が評価できます。ポゾラン反応とコンクリート強度の相関が明らかになったので、この現象を加速してポゾラン反応を早く進めれば、フライアッシュ混合コンクリートの強度を短時間で評価できます。そこで、API法を用いて、強度発現性を評価する方法を検討しました。

短時間で評価する条件を明らかにするため、温度条件を60、70、80とし、12、18、24時間の経過を観測しました。その結果、80、18時間の条件で、ポゾラン反応量を適切に評価できることがわかりました。これにより、従来は3カ月かかった混合コンクリートの強度を約2日間で評価でき、さらにフライアッシュの出荷時に、打設1年後の強度をあらかじめ予測することができるようになりました。

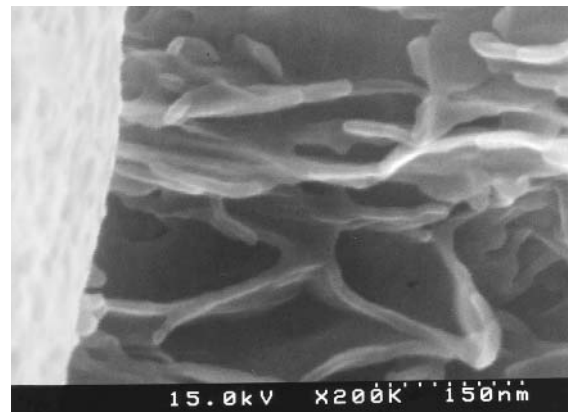
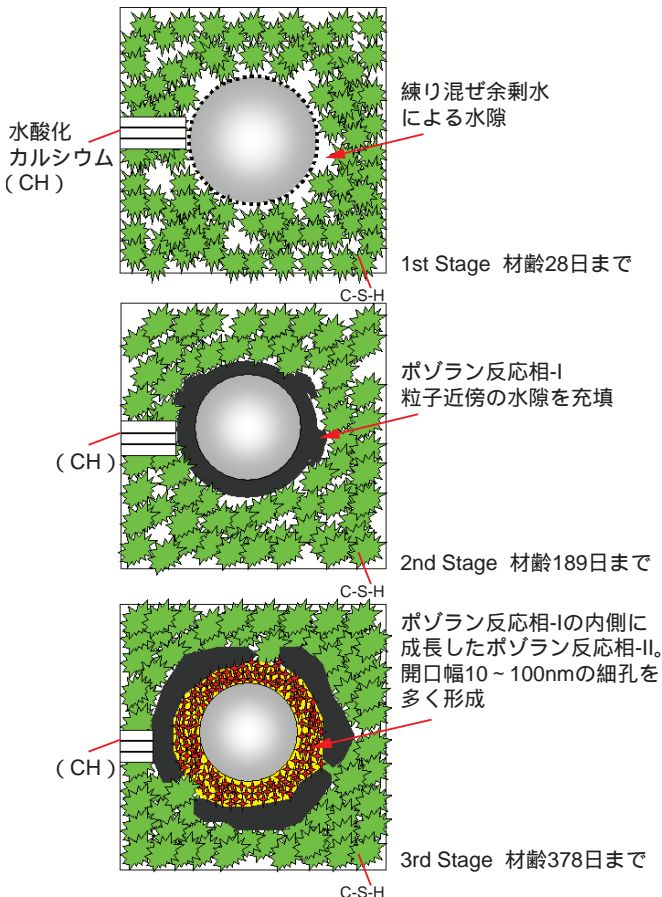


図 ポゾラン反応相-IIの拡大写真（表紙写真の一部）  
フライアッシュ表面（左部）から、厚さ約15nmの板状結晶がからまるように連続している。

図 強度発現のメカニズム

## 特殊条件下で利用できるコンクリートを開発

### 高い耐久性を持つコンクリート

コンクリート構造物は、港湾構造物のように水中にも作られます。わが国にはすでに100年を経過した小樽港のような構造物がありますが、一般的には、コンクリート中の成分が水に溶け出すため、水中での長期の耐久性は保障できません。また、高温下では、水和反応生成物に含まれる結晶水が脱離してろくなり、やはり長期の耐久性は確保できません。

耐久性を高めるには、結晶自体の耐久性が高い「トバモライト」の含有率を高める方法が考えられます。当研究所では、40%のフライアッシュ混合コンクリートに、200 前後の高温で12時間程度の養生を施し、結晶度の高いトバモライトの含有率を高め、高耐久性コンクリートを作ることに成功しました。

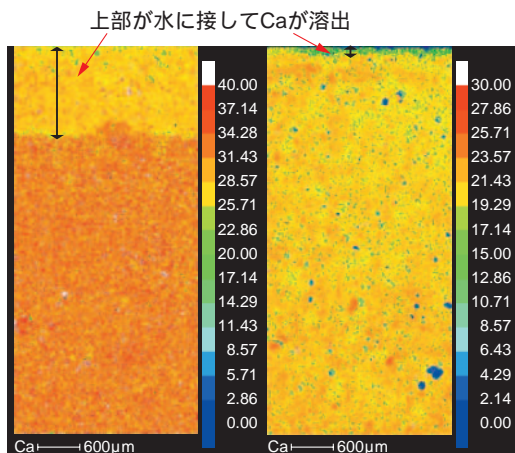


図 高耐久性コンクリートの浸漬試験結果

浸漬13回後、従来のコンクリートはカルシウム(Ca)が水に溶け出すため硬化体中のCa濃度が低下するが、トバモライトコンクリートは、その量はわずかです。

### 耐水性が高く高温下でも使える

このコンクリートの耐水性を長期浸漬試験で調べた結果、コンクリートからの主要成分の溶出量は少なく、従来のフライアッシュ混合コンクリートに比べて、水中での長期耐久性があることがわかりました。

また、高温下での利用については、110 の高温乾燥下で約半年間放置したところ、2%弱の収縮は見られるものの、トバモライトの変化は認められず、耐久性に変化はありませんでした。

この新しいコンクリートは、放射性廃棄物処分施設で使うコンクリート部材など、長期間の耐水・耐熱を確保する必要がある分野などへの適用が考えられます。

### ひとこと



地球工学研究所  
バックエンド研究センター  
主任研究員  
山本 武志

API法はフライアッシュの出荷時に適用できる、画期的な手法です。今後は多くの石炭火力発電所で利用していただけるよう、論文発表などを通じてアピールしていきます。

高耐久性コンクリートについては、フライアッシュの有効利用という点では一つの成果を出すことができましたので、さらに耐久性を高めるにはどうすればよいかを考えています。他の混合材の利用などセメント材料そのものの検討や養生の方法などを工夫し、さらに堅牢なコンクリート構造物の建設を目指し、「コンクリート」を究めていきます。

### 既刊「電中研ニュース」ご案内

- No.425 海水魚を対象とした毒性試験法を開発
- No.424 微生物の電気培養で環境浄化

- No.423 画像による腕金の再利用判定
- No.422 広範囲な海の流れを陸上から把握