

# フライアッシュの強度特性に関する研究

堀内 澄夫  
(技術研究所)

玉置 克之  
(技術研究所)

尾上 篤生  
(技術研究所)

後藤 茂  
(技術研究所)

## § 1. はじめに

エネルギーの石炭化に伴い大量に発生する石炭灰の処理・処分は、石炭化推進上の重要な課題であり、中でも発生量の70%を占め、しかも利用率の低いフライアッシュの処理が最も重要になっている。

現在、各分野でのフライアッシュの利用が検討されているが、その中でも注入材、充填材、道路材などの土木材料としての利用は、大量に処理できる点で推進が期待されている。フライアッシュは主成分が土に近く、また自硬性もあることから、土木材料としての利用の可能性は高いものと考えられる。しかし、利用の際に必要なフライアッシュの物性については必ずしも十分な検討が行なわれておらず、特に土木材料として重要な強度特性に関しては下記の大きな問題点が未解明のまま残されている。

①発電所から排出され、一度も水に接触していない灰（以後、新生灰と呼ぶ）は少量の水を加えて高い密度まで転圧すると、自硬性により数  $\text{kgf/cm}^2$  に及ぶ圧縮強度を発現する<sup>1)~3)</sup>。しかし、転圧を行わずに盛土した場合、その強度は小さく、盛土の崩壊に結びつくことがある<sup>4)</sup>。これは、新生灰のもつ自硬性によって発現する強度が密度に依存するためと考えられるが、両者の関係や材令の影響に関する報告はほとんど見られない。

②灰粒子の飛散による環境上の問題を避けるため、灰を池などに集積し処分することが行われる<sup>5)</sup>。水に浸漬した灰（以後、既成灰と呼ぶ）の強度は新成灰に比べて低いという報告例<sup>6)</sup>はあるが、浸漬時間が強度に及ぼす影響については検討されていない。

③建築用資材および魚礁などへのフライアッシュの利用を目的として、硬化材（主としてセメント）を多量に添加した高強度材料の研究は今までに行なわれてきている<sup>7)~9)</sup>。充填材や道路材のような土木材料には必ずしも高強度は要求されない場合が多いが、セメントを少量添加した低～中強度の材料の強度特性はほとんど明

らかとなっていない。

フライアッシュを土木材料として利用する際に問題となるこれらの点を解明するため、12種の試料を用いて一連の検討を実施した。また、石炭灰と同時に発電所から多量に排出される脱硫石膏の活用も考慮して、新生灰に石膏を添加した場合の強度についても検討を行なった。

## § 2. 実験概要

### 2.1 試料

#### (1)フライアッシュ

実験に用いたフライアッシュの物理・化学的性質は、表-1に示すとおりである。各フライアッシュの記号A～Fは発電所の違いを示し、たとえばA-1～A-20は同一の発電所から排出されたものである。表中の各成分は便宜的に酸化物の形で示しており、実際の存在形態とは異なっている。

全12試料のうち、A-20およびF-10は既成灰であるが、他は新生灰である。A-20はA-2を海水中で3カ月間浸漬したものを、F-10は埋立後数年間経過したものを、それぞれ110℃で乾燥し、乳鉢で粉砕して調製した試料である。

表-1のように、同一の発電所から発生したフライアッシュは成分的にかなり似ている。また、Beletka 他<sup>10)</sup>と同様、豪州炭からのフライアッシュはカルシウム分、鉄分が他に比べて少ない。

#### (2)硬化材

フライアッシュの強度増加材として、普通ポルトランドセメントおよび石膏を用いた。石膏は、火力発電所から排出された排煙脱硫石膏（自然含水比31.3%、比重3.21；以後、排煙石膏と呼ぶ）および試薬用二水石膏の2種を使用した。

#### (3)水

混練水および養生水として東京湾から採取した海水を

| 試料                              | A-1                            | A-2  | A-3  | A-6  | B-1  | B-2  | C-1  | C-2  | D-1  | E-1       | A-20    | F-10        |
|---------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|---------|-------------|
| 粒子比重                            | 2.20                           | 2.19 | 2.23 | 2.25 | 2.22 | 2.18 | 2.26 | 2.23 | 2.15 | 2.28      | —       | 2.21        |
| 平均粒径 $D_{50}(\mu\text{m})$      | 15                             | —    | —    | 17   | —    | 24   | 14   | 50   | 23   | 7.8       | —       | 41          |
| ブレン値 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) | 3230                           | 3050 | 3270 | 3050 | 3700 | 2710 | 3360 | 2510 | 3360 | 4720      | —       | —           |
| 強熱減量値(%)                        | 2.13                           | 2.07 | 2.40 | 3.34 | 9.59 | 3.61 | 4.27 | 5.04 | 2.64 | 4.61      | —       | —           |
| 成分 (%)                          | SiO <sub>2</sub>               | 55.6 | 55.6 | 53.0 | 53.5 | 50.5 | 52.2 | 52.6 | 50.9 | 61.0      | 56.4    | —           |
|                                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 22.8 | 23.8 | 27.8 | 23.7 | 20.9 | 21.8 | 22.9 | 20.8 | 25.7      | 26.4    | —           |
|                                 | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.58 | 5.65 | 5.40 | 4.81 | 6.03 | 8.27 | 6.25 | 7.71 | 2.24      | 3.85    | —           |
|                                 | CaO                            | 7.28 | 7.14 | 7.60 | 7.28 | 5.60 | 7.00 | 5.88 | 6.16 | 3.82      | 3.38    | —           |
|                                 | MgO                            | 2.02 | 2.02 | 2.00 | 2.22 | 1.24 | 1.35 | 1.61 | 1.55 | 1.54      | 1.19    | —           |
|                                 | SO <sub>3</sub>                | 0.52 | 0.50 | 0.40 | 0.33 | 0.71 | 0.96 | 0.79 | 0.57 | 0.14      | 0.38    | —           |
|                                 | Na <sub>2</sub> O              | 1.01 | 1.02 | 1.40 | 1.38 | 1.48 | 1.90 | 1.95 | 1.80 | 0.81      | 0.64    | —           |
|                                 | K <sub>2</sub> O               | 1.42 | 1.35 | 1.30 | 1.59 | 1.13 | 1.17 | 1.40 | 1.19 | 1.99      | 1.06    | —           |
|                                 | MnO                            | 0.05 | 0.06 | 0.05 | 0.08 | 0.06 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.03      | 0.06    | —           |
| $\rho_{dmax}$ (締固め試験)           | —                              | —    | 1.37 | 1.36 | 1.24 | 1.23 | 1.39 | 1.30 | 1.24 | 1.24      | —       | —           |
| 相対密度試験                          | $R-\rho_{dmax}$                | 1.28 | 1.29 | 1.27 | —    | 1.17 | 1.20 | 1.31 | 1.34 | —         | 1.22    | 1.05        |
|                                 | $R-\rho_{dmin}$                | 4.95 | 0.97 | 0.94 | —    | 0.83 | 0.85 | 0.92 | 1.01 | —         | 0.94    | 0.83        |
| 均等係数                            | $U_c$                          | 7.86 | —    | —    | 7.08 | —    | 7.50 | 8.15 | 18.1 | 6.67      | 3.96    | —           |
| 曲率係数                            | $U_c'$                         | 1.20 | —    | —    | 1.16 | —    | 0.99 | 0.95 | 2.46 | 0.74      | 1.10    | —           |
| 備考                              | 炭種                             | 北海道  | 北海道  | 北海道  | 北海道  | 中国   | 中国   | —    | —    | 豪州<br>北海道 | 豪州<br>ア | 北海道         |
|                                 | 灰種                             | 市販用  | 埋立用  | 市販用  | 埋立用  |      |      |      |      |           |         | 埋立地より<br>採取 |

表一 1 フライアッシュの物理・化学的性質

使用した。また、海水との比較の目的で一部の試験に水道水も使用した。

## 2.2 実験方法

### (1) 新生灰の強度発現に関する実験

表一 1 に示す新生灰を用いてフライアッシュの種類、密度および混練水の種類の違いによる強度発現性の相違について検討した。

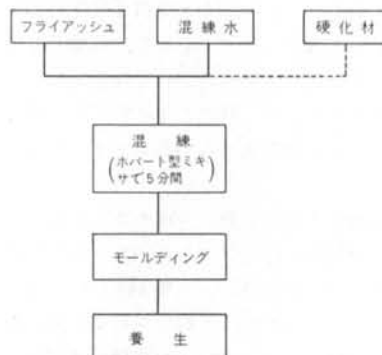
供試体の作成手順を図一 1 に示す。供試体の密度は混練時に加える水の量を調節し、変化させた。なお、乾燥密度は海水中の塩分も含めた値で示してある。混練した試料はモールドング後直ちに密封し、所定材令まで20℃恒温室中で養生した。

強度は、一軸圧縮試験（ひずみ速度：1%/min）により求めた。

### (2) 既成灰の強度発現に関する実験

新生灰と既成灰の強度発現性の相違を検討するため、新生灰としてA-2を、既成灰としてA-20およびF-10の3種の試料を用いて実験を行なった。

供試体は密詰め、中密詰め、およびゆるぎめの3種類の密度で作成した。密詰め、中密詰め供試体はフライアッシュに対して15%の海水を加えて混練した後、モールド内に突固めて作成した。また、ゆるぎめ供試体は乾燥試料をロートによりモールド内に注いで作成した。モー



図一 1 供試体の作成方法

ルドングした3種の試料は直ちに飽和し、新生灰のときと同様の方法で養生し、一軸圧縮試験を行なった。

水との浸漬時間による発現強度への影響は、時間を変えて載荷圧密した試料の強度を比較することによって検討した。すなわち、含水比100%のフライアッシュスラリーを図一 2 に示す圧縮容器に注ぎ込み、圧密開始まで1日、7日、14日の3種に分けて放置した。放置期間終了後、1.6 kgf/cm<sup>2</sup>まで段階的に圧密し、28日間20℃で養生した後、一軸圧縮試験により強度を求めた。

### (3) 硬化材による強度増加に関する実験

供試体は、図一 1 に示した方法に従って作成した。養生および一軸圧縮試験についても、(1)と同様の方法による。

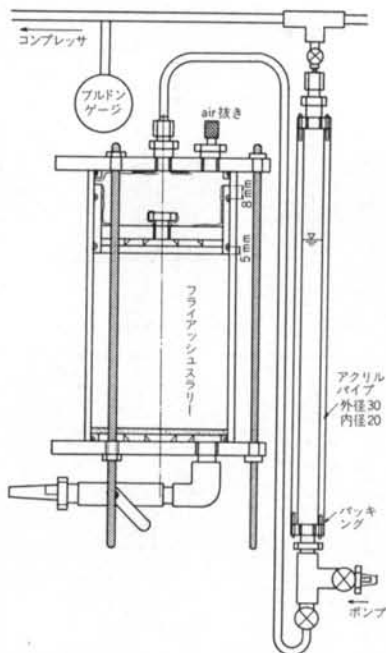


図-2 低圧圧密装置

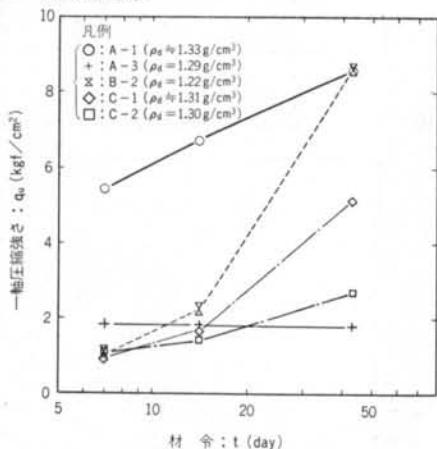


図-3 初期含水比35%における各フライアッシュの強度発現

### § 3. 実験結果

#### 3.1 新生灰の強度

新生灰の一軸圧縮強度 ( $q_u$ ) と材令 ( $t$ ) との関係を図-3に示す。この図の場合も含め、ほとんど全てのフライアッシュにおいて、 $q_u$  は材令に伴って増加している。

図-4に、乾燥密度 ( $\rho_d$ ) と  $q_u$  との関係を示す。いずれのフライアッシュにおいても  $q_u$  は  $\rho_d$  とともに増加している。しかし、 $q_u$  の大きさおよび  $\rho_d$  に伴う  $q_u$  の増加率は、フライアッシュの種類によって異なっている。また、同一の供試体作成方法を用いても、灰の種類によ

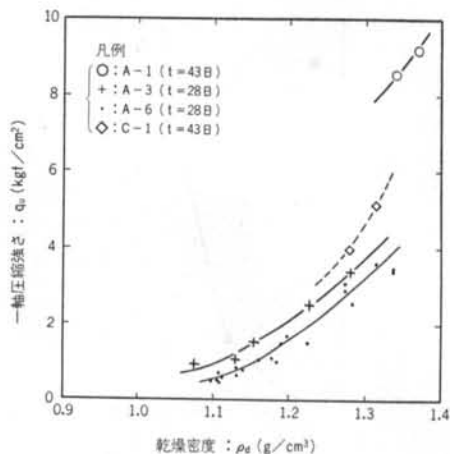


図-4 各種のフライアッシュにおける乾燥密度と一軸圧縮強度との関係

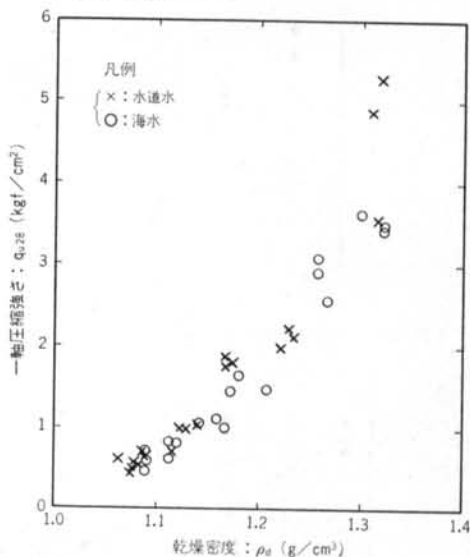


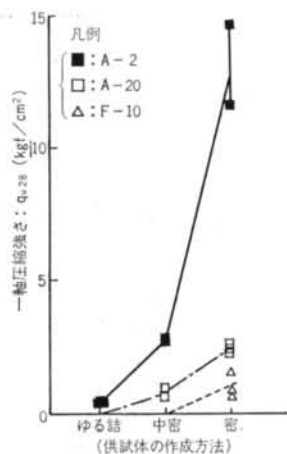
図-5 フライアッシュの一軸圧縮強度に及ぼす混練水質の影響 (試料A-6,  $t=28$ 日)

って乾燥密度は異なっている。

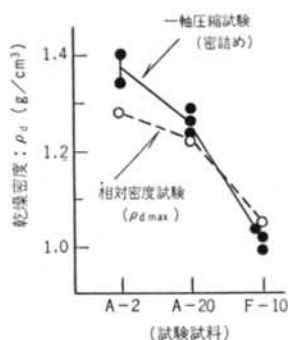
混練水の違いによる発現強度への影響を図-5に示す。この図では、海水を使用した供試体の乾燥密度を海水中の塩分 (3.6%) を差し引いた値で示してある。混練水の違いは発現強度にほとんど影響を及ぼさず、水道水の場合も  $q_u$  は  $\rho_d$  とともに増加している。

#### 3.2 既成灰の強度

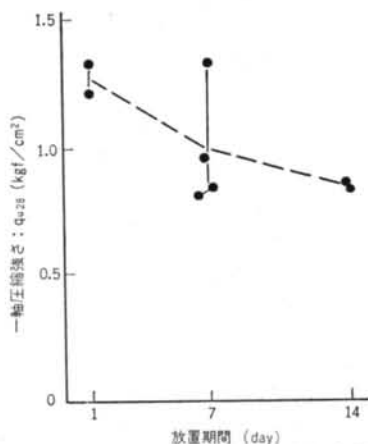
供試体の作成方法と  $q_u$  との関係を図-6に示す。 $q_u$  の大きさは、いずれの試料においても (密詰め>中密詰め>ゆる詰め) の順であるが、 $q_u$  自体はフライアッシュの種類によって大きく変化している。すなわち、新生灰



図—6 作成方法による一軸圧縮強さの相違



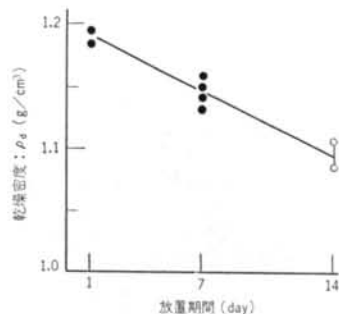
図—7 試料による締固め後密度の相違



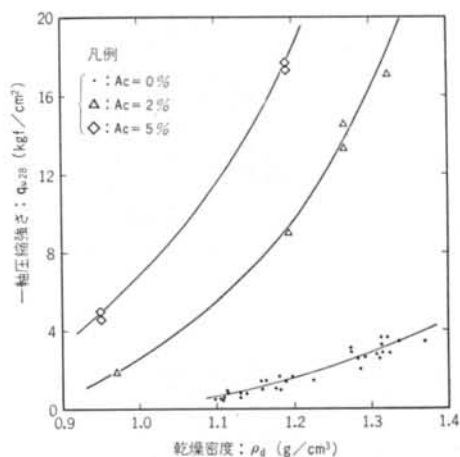
図—8 圧密後試料 (ゆる詰め) の一軸圧縮試験結果

である試料A-2の密詰め供試体の  $q_u$  は  $10 \text{ kgf/cm}^2$  以上と極めて大きい、既成灰である試料A-20およびF-10はその1/5以下に低下している。

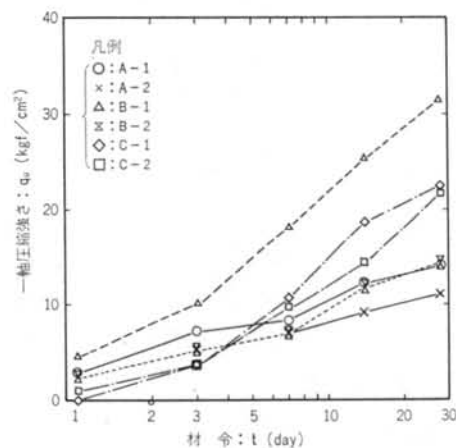
図—7は、供試体作成方法と  $\rho_d$  との関係である。同一の作成方法をとったにもかかわらず、 $\rho_d$  は既成灰の方が小さい。



図—9 圧縮後の  $\rho_d$  と放置期間の関係



図—10 セメントの添加による強度増加効果(A-6, 材令28日)



図—11 セメントを7%加えたフライアッシュの強度発現 ( $\rho_d \approx 1.3 \text{ g/cm}^3$ ,  $A_c = 7\%$ )

図—8は、浸漬時間による発現強度の相違を示している。放置期間を除いて試験条件は全て等しいにもかかわらず  $q_u$  に差を生じており、放置期間が長いほど  $q_u$  は小さい。また、図—9のように供試体の  $\rho_d$  は放置期間が長いほど小さい。

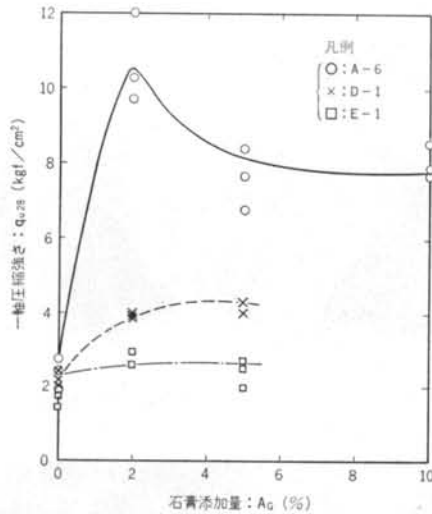


図-12 二水石膏の添加によるフライアッシュの  $q_u$  の増加

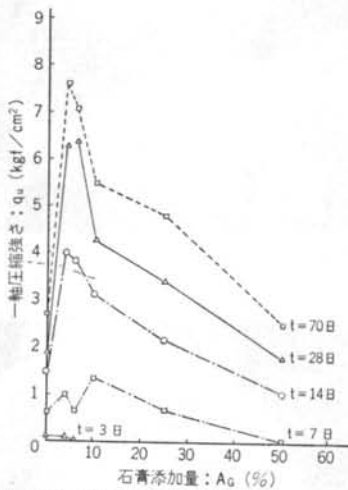


図-13 石膏添加効果の材令変化

### 3.3 硬化材による強度増加

図-10は、セメントを添加した供試体の  $q_u$  と  $\rho_a$  との関係である。セメント添加率 ( $A_c$ ) は、フライアッシュに対するセメントの重量比である。セメントの添加による  $q_u$  の増加は著しく、 $A_c=0\%$  に比べて  $A_c=2\%$  で約5倍、 $A_c=5\%$  では約10倍となっている。また、セメント無添加の場合と同様  $q_u$  は  $\rho_a$  とともに増加している。

図-11は、材令による  $q_u$  の変化を示している。フライアッシュの種類によって  $q_u$  の値は異なるが、いずれの場合も材令に伴って  $q_u$  は著しく増加している。

図-12は、二水石膏を3種のフライアッシュに添加した場合の  $q_u$  を示している。石膏の添加率 ( $A_g$ ) は、フライアッシュに対する石膏の重量比である。試料E-1を除いて、二水石膏を添加することによりフライアッシ

ユの  $q_u$  は大きく増加している。また、A-6に関しては  $A_g=2\%$  付近に最適値が認められる。

石膏添加による  $q_u$  の増加は、セメントを添加した場合にも認められる。図-13は、フライアッシュに2%のセメントおよび0~50%の排脱石膏を添加したときの  $q_u$  を示している。 $A_g=5\%$  前後で石膏無添加の2倍以上の  $q_u$  が得られている。また、 $A_g>10\%$  では初期材令での  $q_u$  は小さいが、材令による  $q_u$  の伸びが大きい。たとえば、 $t=7$  日における  $q_u$  は、 $A_g=0\%$  と  $A_g=25\%$  とでほぼ等しいが、材令に伴う増加率は  $A_g=25\%$  の方が大きく、 $t=70$  日では  $A_g=0\%$  にくらべて約2倍の  $q_u$  が発現している。

## § 4. 考察

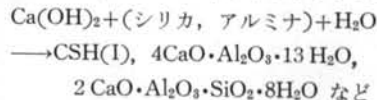
### 4.1 水との浸漬と自硬性

フライアッシュの自硬性による強度発現に関する報告は少なくないが、その機構に触れたものはほとんどない。しかし、セメント化学や化学系地盤改良などの分野での報告<sup>(11)(12)</sup>からすれば、以下の3種の反応が主体となっていると推察される。

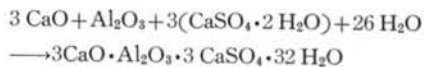
#### ①生石灰の水和反応



#### ②石灰分とシリカ・アルミナとのポツラン反応



#### ③エトリンジャイト生成反応



(エトリンジャイト)

この3種の反応は、いずれも水の消費を伴っているため、新生灰を水に浸漬した瞬間から反応が始まり進行して行く。同時に、新生灰の持っていた自硬性は水との浸漬時間とともに次第に失われて行くことになる。

図-14は、図-6の結果を  $\rho_a$  と  $q_u$  との関係で表わしたものである。同一の密度では、A-2にくらべてA-2の既成灰であるA-20の  $q_u$  は小さく、水との浸漬によって自硬性が減少することが明らかである。

一方、水との浸漬によって自硬性は減少するものの、完全には消失していない。これは、上述した反応のうち②および③の進行速度が遅いためと考えられる。

このような自硬性の変化が①~③の反応によって生じていることを確認する目的で、電子顕微鏡による微視構

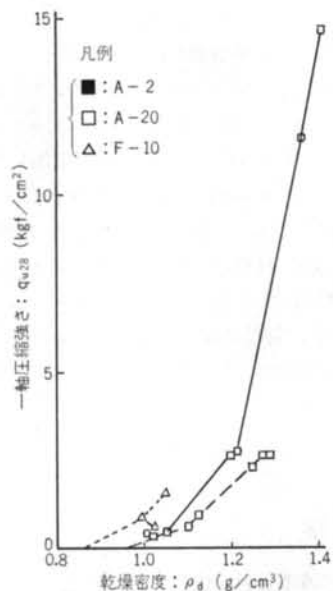


図-14 密度と一軸圧縮強さの関係

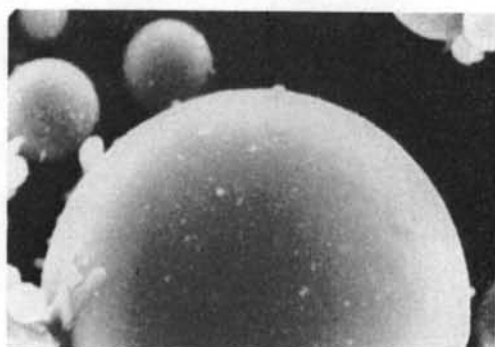


写真-1 新生灰 (A-6) の表面構造



写真-2 既成灰 (A-6) の表面構造 (浸漬後7日) 造の観察, およびX線回折による結晶物質の同定を行なった.

写真-1~4は, 試料A-6の表面が水との浸漬時間

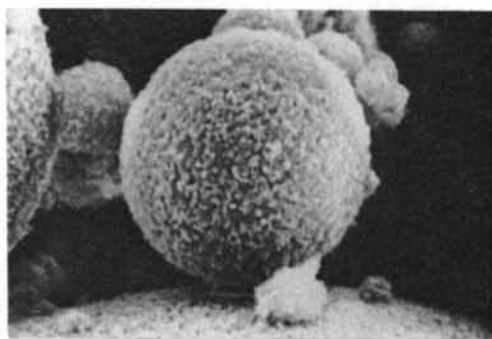


写真-3 既成灰 (A-6) の表面構造 (浸漬後28日)

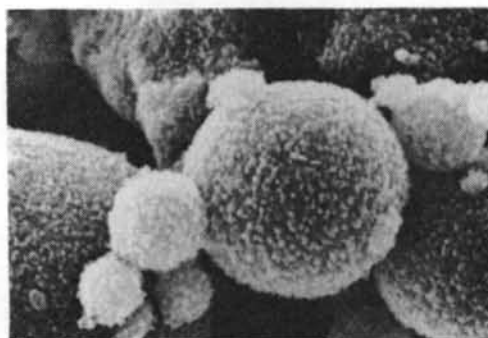


写真-4 既成灰 (A-6) の表面構造 (浸漬後80日)

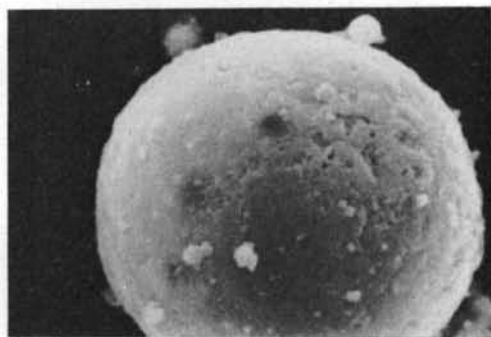


写真-5 既成灰 (F-10) の表面構造 (浸漬後数年) によって変化することを示している. すなわち, 新生灰の時点では非常に滑らかであった表面が, 水との化学反応によって生成した物質によって覆われて行き, 浸漬時間の経過とともに表面の凹凸が激しくなって行く. そして浸漬後数年経過すると, 写真-5 (F-10) のように, 反応生成物がフライアッシュの表面を厚く覆うようになる. このような表面に凹凸を生じたフライアッシュ——すなわち, 既成灰——は同一方法を用いて締固めても, 新生灰に比べて間隙が大きくなると考えられる. 図-7

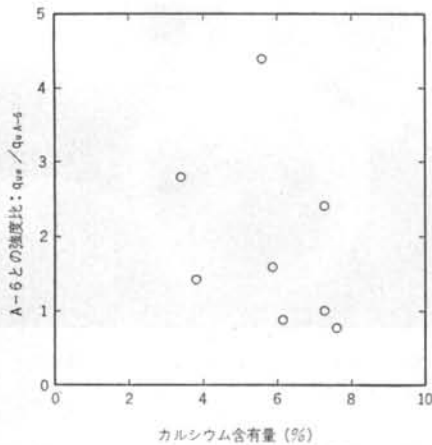


図-15 フライアッシュ中のカルシウム含有量と自硬性との関係 (t=43日)

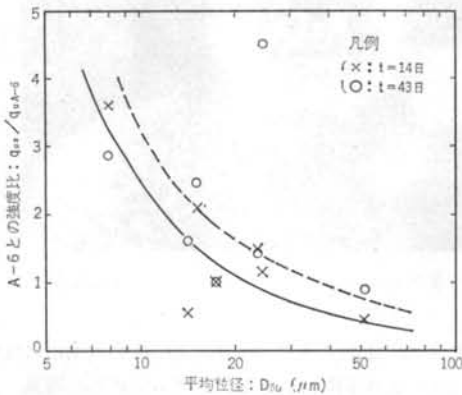


図-16 フライアッシュの粒径と自硬性との関係

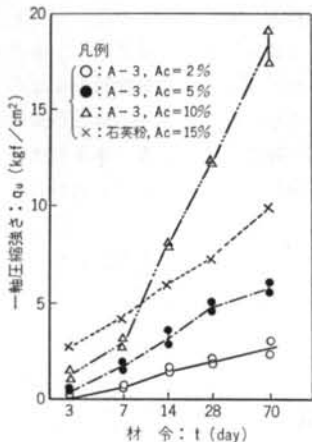


図-17 セメント添加率の異なるフライアッシュ混合物の強度と材令の関係

の傾向は、この結果生じたものと推察される。しかし、X線回折での生成物の同定はできなかった。これは、生

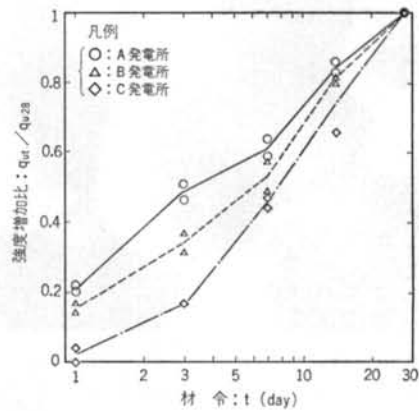


図-18 セメントを添加したフライアッシュの強度増加傾向成物の結晶度が低いと考えられる。

以上のように、フライアッシュの自硬性を有効に利用するためには、新生灰の状態で、かつ密度の高い状態で用いることが必要であり、ある程度浸漬時間が経過したものは密度が低く、また強度発現も小さくなる。

#### 4.2 成分と自硬性

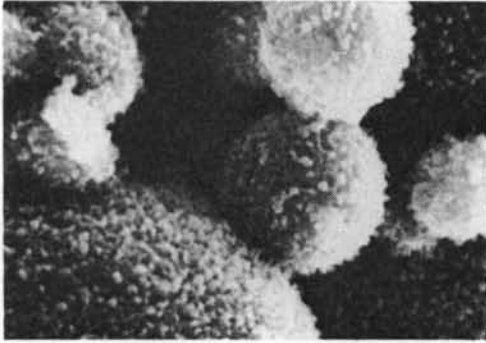
図-4のように、フライアッシュの種類は発現強度に大きく影響する。これはフライアッシュの成分、物性によって自硬性が変化するためである。しかし、自硬性に関して具体的な因子を取り上げて検討した例は少ない。ここでは、各新生灰と試料A-6との  $q_u$  を同一密度で比較した値 ( $q_{uA}/q_{uA-6}$ ) によって自硬性を評価し、主な因子との相関性を検討する。

石灰は、①~③の硬化反応すべてに関係している。図-15は自硬性とカルシウム量との関係を示すが、両者間の相関性は低い。これは Chae 等<sup>13)</sup>が推論しているように自硬性にはフリーライムが関与しているためであり、カルシウム化合物が全て関与しているわけではないと考えられる。

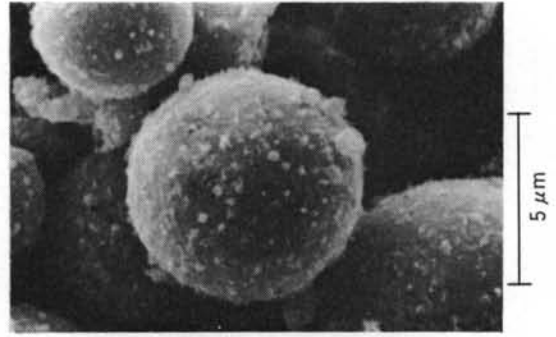
Joshi<sup>14)</sup>によれば、粒径が小さくなるほどフライアッシュのポゾラン活性は高くなる。図-16は、平均粒径と自硬性との関係を示している。材令14日では粒径が小さくなるにしたがって自硬性は急激に増加しており、ポゾラン活性の増加は自硬性を大きく増加させるものと考えられる。一方、材令28日ではその傾向に若干の変化が見られる。これは、フライアッシュの自硬性には多くの因子が関与しているためと推察される。

#### 4.3 硬化材の効果

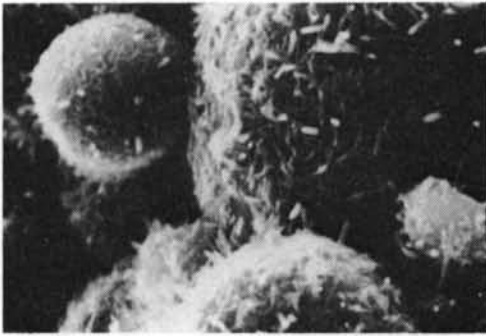
フライアッシュは人工ポゾラン材とも呼ばれ、セメントや石灰との反応性が高いことが知られている。このた



写真—6 石膏を添加したフライアッシュの表面構造  
(A-6,  $A_G=2\%$ ,  $t=28$ 日)



写真—8 石膏を添加したフライアッシュの表面構造  
(E-1,  $A_G=2\%$ ,  $t=28$ 日)



写真—7 石膏を添加したフライアッシュの表面構造  
(D-1,  $A_G=2\%$ ,  $t=28$ 日)



写真—9 石膏を添加したフライアッシュの表面構造  
(A-6,  $A_G=2\%$ ,  $t=28$ 日)

め、フライアッシュ単独では所定の強度が望めないような場合には、Bradbury<sup>15)</sup>の指摘にもあるように、セメントや石灰の添加は非常に有効であると考えられる。

図—17は、フライアッシュおよびフライアッシュとほぼ同一の平均粒径をもつ石英粉に対してセメントを添加したときの、強度発現の違いを示している。石英粉へのセメント添加量が多かったために初期材令での $q_u$ は石英粉の方が大きい、7日以降では逆転しており、フライアッシュはセメントとの反応性が高いことが明らかとなっている。また、図—18は材令28日と各材令との $q_u$ の比を示しており、同一発電所から発生したフライアッシュの強度増加傾向は類似していることが分かる。これは、同一発電所から排出されるフライアッシュの組成は原料炭の関係から基本的に似ているためと考えられる。

金沢<sup>16)</sup>によれば、石膏の添加はセメントを多量に添加したフライアッシュの $q_u$ を大幅に増加させる。同様の $q_u$ の増加は、セメント無添加(図—12)および低セメント添加(図—13)においても確認されるが、その程度はフライアッシュの種類によって大きく異なっている。

石膏添加による $q_u$ の増加には、前述したエトリンジ

ャイト生成反応が関与しており、またその効果には反応の進行度が大きく関係していると考えられる。写真—6～8は、電子顕微鏡による反応進行状況の観察結果を示している。試料A-6、D-1ではフライアッシュ表面に多量の反応生成物が沈積し粒子同士を接着させているのに対し、試料E-1では沈積物質が少なく、石膏添加による $q_u$ の増加と反応生成物の量とが深い関係にあることが分かる。写真—4と写真—9とを比較すれば明らかかなように、反応生成物の形状は石膏の有無によって異なる。しかし、反応生成物の結晶度は低く、X線回折による分析ではエトリンジャイトなどの発生は確認できなかった。

## § 5. 結論

(1) フライアッシュは水と化学反応を起こし、その結果として強度を発現する。このときの強度は、フライアッシュの密度が増すに伴い著しく大きくなる。密度による強度増加は、セメントを添加したフライアッシュについ



でも認められる。

(2)水に浸漬した履歴をもつフライアッシュは、化学反応の一部が済んでいること、および粒子表面の反応生成物により高い密度に締固まらないことから、これを再度水と混練して締固めても強度は小さい。

(3)同一密度で比較すれば、フライアッシュの粒径が小さいほど自硬性は大きい。

(4)セメントの添加は強度を大きく増加させる。フライアッシュの種類によっても異なるが、2%のセメント添加によって、強度は無添加時の5~10倍にもなる。

(5)石膏の添加は、セメントの添加の有無にかかわらずフライアッシュの強度を増加させる。フライアッシュの種類によっては、石膏を2%添加することにより、強度

を無添加時の3倍以上に増加させる。また、2~5%に石膏添加の最適値が認められる。

## § 6. おわりに

今後増大すると考えられる石炭灰を有効に利用し、あるいは効率よく処分する方法を検討するために行なってきた各種の実験のうち、フライアッシュの自硬性の問題と強度に及ぼす添加材の効果とに関して得られた成果を報告した。フライアッシュは、その自硬性を生かして有効利用すべきであり、未浸漬、高密度、排脱石膏の添加などの条件を満足させるべきと考える。

## ＜参考文献＞

- 1) G. Gatti & L. Tripiciano: "Mechanical Behavior of Coal Fly Ashes" Proc. 10th ICSMFE, Vol. 2 (1982) pp. 317~322
- 2) D.H. Gray & Y.K. Lin: "Engineering Properties of Compacted Fly Ash" Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, A.S.C.E., Vol. 98, No. SM4 (1972) pp. 361~380
- 3) S. Raymond: "Pulverized Fuel Ash as Embankment Material" Proc. of Institution of Civil Engineers, Vol. 19(1961) pp. 515~536, 900~904
- 4) 三木五三郎: "石炭灰による土地造成の問題点" 材料 第19巻, 第205号(1970年) pp. 900~904
- 5) D.L. Kinder & R.E. Morrison: "An Engineering Approach for Using Power Plant Ash in a Structural Fill" Proc. 7th Ky. Coal By-prod. Semin. (1982) pp. 7~11
- 6) H.B. Sutherland, T.W. Finlay & I.A. Cram: "Engineering and Related Properties of Pulverized Fuel Ash" Journal of Institution of Highway Engineers (June 1968) pp. 19~27
- 7) E.J. Barenberg: "Utilization of Ash in Stabilized Base Construction" Proc. 3rd International Ash Utilization Symposium (1973)
- 8) 高島敏男他: "石炭灰等を用いた硬化体の研究について (石炭灰処理システムと有効利用技術)" フジテクノシステム (1981年) pp. 527~540
- 9) G.S. Littlejohn et al: "Mix Design for Underbase Grouting of the Ninian Central Platform" Proc. 1st International Conf. on Ash Technology and Marketing, Paper 5.5 (1978)
- 10) J. Beretka et al.: "Properties and Pozzolanic Behaviour of Australian Fly Ash" Journal of Australian Ceramic Society, Vol. 12, No. 1 (1975) pp. 13~19
- 11) 笠井順一: "地盤改良の化学" セメントコンクリート No. 391 (1979年) pp. 11~17
- 12) 有泉昌: "土質安定材 (新しい資源・セッコウとその利用)" ソフトサイエンス社 (1976年) pp. 427~437
- 13) Y.S. Chae et al.: "Vibratory Compaction of Fly Ash" Proc. Conf. on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials (1977) pp. 41~62
- 14) R.C. Joshi: "Sources of Pozzolanic Activity in Fly Ashes: A Critical Review" Proc. 5th International Ash Utilization Symposium (1979) pp. 610~623
- 15) H.W. Bradbury: "The Use & Potential for Fly Ash in Grouting" Proc. 5th International Ash Utilization Symposium (1979) pp. 911~929
- 16) 金沢紀一: "石炭灰利用の硬化体 (石炭灰の有効利用技術の最新動向)" 情報開発 (1982年)

