

養生中の温度および湿度が、フライアッシュを用いたコンクリートの強度におよぼす影響

正員 左右田 孝 男*
正員 山 崎 寛 司**

EFFECT OF TEMPERATURE AND HUMIDITY DURING CURING ON STRENGTH OF CONCRETE CONTAINING FLY ASH

By Takao Soda, C.E. Member, and Kanji Yamazaki, C.E. Member

Synopsis : The effects of curing conditions on the strength of concrete containing fly ash were studied. As a result, it has been found out that the curing conditions, such as the variation of curing temperature and relative humidity, have some influence upon the strength of concrete containing or not containing fly ash in the same way. If the proportion of concrete is designed reasonably, the use of fly-ash is often advantageous for the strength of concrete.

要 旨 フライアッシュを用いたコンクリートの強度を、養生温度および養生湿度をいろいろに変えて試験し、フライアッシュを用いないコンクリートの強度と比較した。コンクリートはフライアッシュを用いた場合もフライアッシュを用いない場合も、標準養生の材令 28 日の強度が等しくなるように、配合を決めた。したがってフライアッシュを用いたコンクリートでは、フライアッシュを用いない場合にくらべ単位セメント フライアッシュ量が増加している。このように配合を決めた場合、養生温度および湿度がコンクリートの強度におよぼす影響は、フライアッシュを用いた場合も、フライアッシュを用いない場合も同程度であり、条件によっては、フライアッシュを用いた方がより高い強度を示す場合のあることが示された。

1. 緒 言

フライアッシュを混合使用したコンクリートが工事現場において温度、湿度の一定でない養生条件の下におかれたときの強度の発現に関してはまだ疑問の点が多い。このためほかの混合セメントを用いる場合の注意と同様フライアッシュを用いる場合には、これを用いない場合にくらべて、湿潤養生の期間を長くするなど特に慎重な養生が望まれている。しかしダム以外の舗装あるいは一般土木構造用コンクリートにフライアッシュを用いた場合の養生条件の影響に関する研究は、これまでほとんど行なわれなかったようである。

このような問題を検討するため養生温度を 5°C, 20°C, 30°C と変えた場合、および水中養生の期間を 0 日、2 日、6 日、13 日、27 日と変え以後空中に放置して乾燥養生を行なった場合の圧縮強度および曲げ強度を試験し、フライアッシュを用いた場合と用いない場合の差異を比較した。

試験に用いたコンクリートの配合はフライアッシュを用いた場合に用いない場合とスランプおよび材令 28 日圧縮強度 (20°C 水中養生) が同じになるように選んだ。フライアッシュの使用が最初主としてダム コンクリートの分野で発達したためセメントの一部をフライアッシュで置き換えて使用されることが多いが、初期材令の強度を目標に配合設計する方法は、舗装コンクリートおよび一般土木構造用コンクリートの実際にそくした方法であって、これによってダム以外の用途のコンクリートにフライアッシュを用いる場合の参考となる試験結果を得ることができた。

本試験は土木学会フライアッシュ小委員会の共同研究の一部として行なわれ、なお試験には小委員会の配布した共通試料のうち品質のかなり相違する 4 種のフライアッシュを用い、その平均値をもって比較検討したのでフライアッシュの一般的傾向を示す結果が得られたものと思われる。

2. 実 験 方 法

(1) 使用材料

(a) セメント 普通ポルトランドセメントを用いた。

*日本セメントKK主任研究員

**日本セメントKK副主任研究員

(b) フライアッシュ 土木学会フライアッシュ小委員会が共通試料として配布した市販フライアッシュ 4 種類を用いた。

JIS A 6201 による試験の結果は表-1 に示すとおりである。4 種類のフライアッシュの間にはかなり品質の

表-1 用いたフライアッシュの性質

| 種類 | 強熱減量 (%) | 湿分 (%) | シリカ SiO ₂ (%) | 比重 | 粉末度 | | 単位水量比 (%) | 圧縮強度比 | | |
|----|----------|--------|--------------------------|------|--------------------------|----------|-----------|-------|------|-------|
| | | | | | ブレン (cm ² /g) | 44 μ (%) | | 7 日 | 28 日 | 91 日 |
| | | | | | A | 0.95 | 0.22 | 60.44 | 2.03 | 3 500 |
| B | 1.17 | 0.41 | 55.94 | 2.41 | 3 500 | 1.9 | 91 | 87 | 87 | 108 |
| C | 1.59 | 0.18 | 53.76 | 2.17 | 3 410 | 14.9 | 95 | 68 | 72 | 93 |
| D | 1.09 | 0.19 | 61.08 | 2.11 | 3 150 | 18.3 | 97 | 63 | 67 | 83 |

差が認められる。例えば単位水量比は最大 97% (Dフライアッシュ)、最小 91% (Bフライアッシュ) であり、材令 91日 の圧縮強度比は 83~108% の範囲に変化している。しかしいずれのフライアッシュも JIS の規定に合格するものである。

(c) 骨材 粗骨材、細骨材とも相模川産のものを用いた。いずれもふるい分けたものを所定の粒度 (細骨材 F.M=2.82, 粗骨材 F.M=6.95) となるよう合成し、表面乾燥飽和状態で使用した。

(2) コンクリートの配合

次の条件を満足するようにコンクリートの配合を定めた。

(a) 骨材最大寸法.....25 mm

(b) スランプ.....7±0.5 cm

(c) W/C+F.....20°C 水中養生の材令 28 日における圧縮強度が約 380 kg/cm² となるよう予備実験を行なって定めた。

(d) F/C+F (フライアッシュの混合割合).....25%

その結果は表-2 に示すとおりである。フライアッシュを用いた場合と用いない場合の材令 28 日における圧

表-2 コンクリートの配合

| No. | 用いたフライアッシュ | F/C+F (%) | W/C+F (%) | S/A (%) | スランプ (cm) | 諸材料の単位量 (kg/m ³) | | | | | |
|-----|------------|-----------|-----------|---------|-----------|------------------------------|-----|----|-----|-----|-------|
| | | | | | | C+F | C | F | W | S | G |
| 1 | なし | 0 | 55.0 | 42.5 | 7.5 | 291 | 291 | 0 | 160 | 830 | 1 150 |
| 2 | A | 25 | 43.0 | 41.0 | 7.5 | 350 | 262 | 88 | 150 | 774 | 1 145 |
| 3 | B | 25 | 41.5 | 39.5 | 7.5 | 350 | 262 | 88 | 145 | 760 | 1 192 |
| 4 | C | 25 | 43.4 | 39.8 | 7.5 | 350 | 262 | 88 | 152 | 773 | 1 200 |
| 5 | D | 25 | 43.7 | 39.5 | 7.5 | 350 | 262 | 88 | 153 | 745 | 1 170 |

縮強度を等しくするような配合設計の方法は平野、北条がくわしく報告している。

今回の試験では都合によりフライアッシュ C を用いた場合の配合をその 28 日圧縮強度 (20°C 水中養生) がフライアッシュを用いない場合と等しくなるように定めた。フライアッシュ A, B および D を用いた場合の配合は、これと単位セメント量および単位フライアッシュ量を同じにし、同じスランプを得られるような単位水量を試し練りによって決定した。したがって各フライアッシュについて、W/C+F が若干相違し 20°C 水中養生を行なった場合の 28 日圧縮強度 (フライアッシュなし.....387 kg/cm², A.....378 kg/cm², B.....392 kg/cm², C.....372 kg/cm², D.....369 kg/cm²) の間にも若干の差が認められる。しかし試験誤差を考えれば大体同じ品質のコンクリートになるような配合が決定できたといえよう。

これらの配合をさらにくわしく見ると単位水量は B フライアッシュを用いた場合が 145 kg/m³ でほかの 3 種類にくらべていちじるしく減少が大きい。このため強度もほかに比して若干高い結果を示したものと思われる。

(3) 強度試験

(a) 試験の種類.....圧縮強度試験および曲げ強度試験

(b) 材令.....3 日, 7 日, 14 日, 28 日, 91 日, 182 日

(c) 供試体.....圧縮強度 φ10×20 cm 円柱供試体

曲げ強度 10×10×40 cm はり供試体

おのおの 1 試験条件, 1 材令に 3 本ずつ

(4) 養生条件

(a) 養生温度に関する試験

5°C }
20°C } 水中養生
30°C }

(b) 水中養生期間の変化に関する試験

- ① 脱型後ただちに空中養生
- ② 脱型後 2 日間水中養生以後空中養生
- ③ " 6 日間 "
- ④ " 13 日間 "
- ⑤ " 27 日間 "

成形後 24 時間で脱型した。養生温度は水中、空中のいずれも 20°C であった。また空中養生を行なった恒温室の湿度は R.H 60~80% であった。空中養生を行なった供試体は強度試験のまえにふたたび水中に浸けることなくそのまま試験を行なった。

3. 養生温度の影響

養生温度を 20°C, 5°C, 30°C (いずれも水中養生) とした場合の材令と圧縮強度の関係は 図-1, 図-2, および 図-3 に示すとおりであり、同じく材令と曲げ強度の関係は 図-4, 図-5 および 図-6 に示すとおりである。

これらの図において実線はフライアッシュを用いない場合 (すなわち配合 No. 1 のコンクリート) の強度を、点線は A, B, C および D の 4 種のフライアッシュをそれぞれ用いたコンクリートの平均強度を示している。また図中各材令における縦の太線は A, B, C, D 4 種のフライアッシュを用いた場合の強度の最大値と最小値の範囲を示している。

4 種のフライアッシュの間の強度の差はこの太線からわかるようあまりいぢるしくない。それでこれらの平均値を代表としてフライアッシュを用いたコンクリートの一般的傾向を論ずることとする。

長期材令における強度の増加が大きいことはフライアッシュの長所として従来よりいわれてきたのであるが養生温度 20°C とした 図-1 の結果はこの性質を明瞭に示すものである。すなわちフライアッシュを用いない場合 26 週における強度は 4 週における強度の 11% 増加しているに過ぎないが、フライアッシュを用いた場合は約 60% の増加を示している。

低温度 (5°C, 図-2) においてはフライアッシュを用いたコンクリートの強度発現は用いない場合に比して少しも劣ることなく材令が長期になるほどフライアッシュを用いた方が有利となることがわかる。

すなわち低温においてもフライアッシュを用いることの利点は長期材令においてよく発揮されるのである。

高温度 (30°C, 図-3) においてはフライアッシュを用いることの効果は材令 1 週頃より現われており材令 4 週においてすでに用いない場合より 25% 程度高い強度を示している。

図-1 養生温度 20°C (水中) における材令と圧縮強度の関係

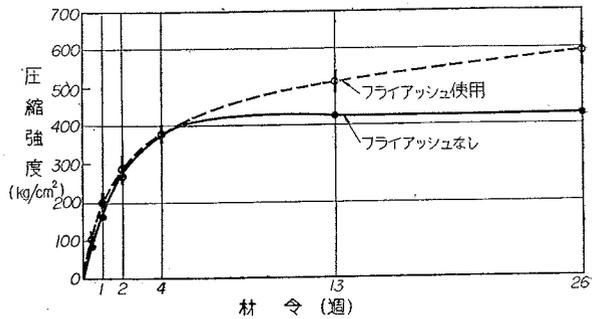


図-2 養生温度 5°C (水中) における材令と圧縮強度の関係

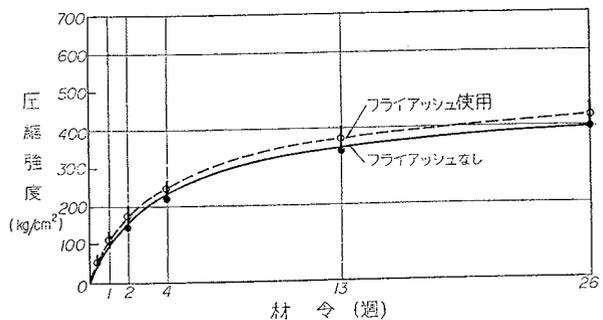
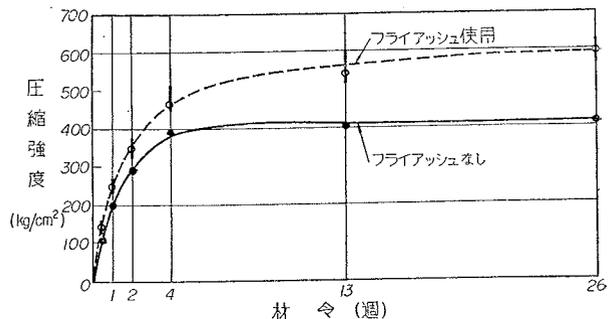


図-3 養生温度 30°C (水中) における材令と圧縮強度の関係



また用いない場合が4週以降ほとんど強度の増加を示さないのに対し用いた場合はさらに着実な増加を続け26週においては両者の間に50%程度の差異を生じるに至っている。

曲げ強度についても圧縮強度の場合と同様の傾向が認められフライアッシュを用いたコンクリートが養生温度によらず長期材令にいたるまですぐれた強度増加を続けることが示された。特に異なった点はフライアッシュを用いたコンクリートが用いないものに比して圧縮強度が同一になるよう配合を定めたにもかかわらず曲げ強度が10%高いことであって、フライアッシュを用いたコンクリートの曲げ強度がすぐれていることを示している。また曲げ強度では養生温度の影響が圧縮強度より少なく低温養生でも影響されることが少ない。

以上のように材令28日の圧縮強度が等しくなるように配合を定めた場合フライアッシュを用いたコンクリートの強度は養生温度の低いときにも、フライアッシュを用いない場合に比していずれの材令でも劣ることなく、養生温度が高いときにはフライアッシュの効果が初期材令のうちから現われ、かえって高い強度を示す結果がえられた。

4. 水中養生期間の影響

2. (4) に記したように水中養生期間を変えることによって生じる圧縮強度の変化は図-7 (フライアッシュを用いないコンクリートの場合) および 図-8 (フライアッシュを用いた場合、4種の平均) に示すとおりであった。この場合も養生温度に関する実験結果と同様に4種類のフライアッシュの間には若干のばらつきがあったがほとんど同じような傾向を示したので、これらの平均値をもって一般にフライアッシュを用いたことの影響を検討することとする。

水中養生の期間が長いほどフライアッシュを用いても用いなくても強度の発現がよいことは従来いわれているとおりであるが、本実験のような方法でコンクリートの配合を定めればフライアッシュを用いた場合の方がむしろ乾燥の影響が少ない結果が認められた。材令26週の強度において水中養生(20°C)28日の圧縮強度を100とした指数値でくらべてみると表-3のようになる。

すなわちフライアッシュを用いない場合には27日間水中養生したのち乾燥を受けると材令26週に至って強度が低下するのに反して、フライアッシュを用いた場合にはなお強度の増進が認められるのであって13日程度の水中養生を行なえば以後空中に放置しても水中養生4週の強度より下まわらないことがわかった。

土木学会コンクリート標準示方書(無筋コンクリート47条)では打ち込み後、少なくとも7日間湿潤状態に保たねばならないとしているが、フライアッシュを用いた場合もこの規定が満足されることが示された。

今回の実験のように材令4週における圧縮強度(20°C水中)およびスランプがフライアッシュを用いない場

図-4 養生温度 20°C (水中) における材令と曲げ強度の関係

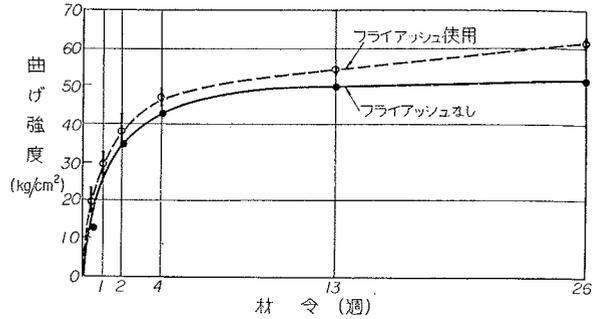


図-5 養生温度 5°C (水中) における材令と曲げ強度の関係

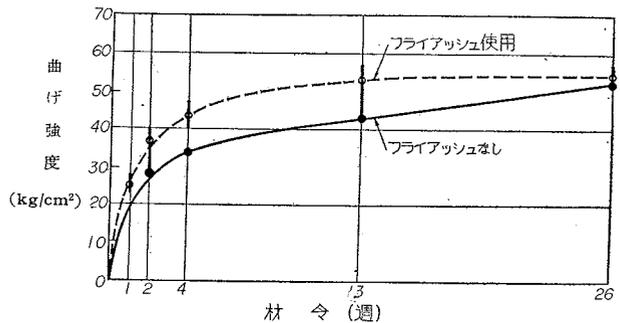


図-6 養生温度 30°C (水中) における材令と曲げ強度の関係

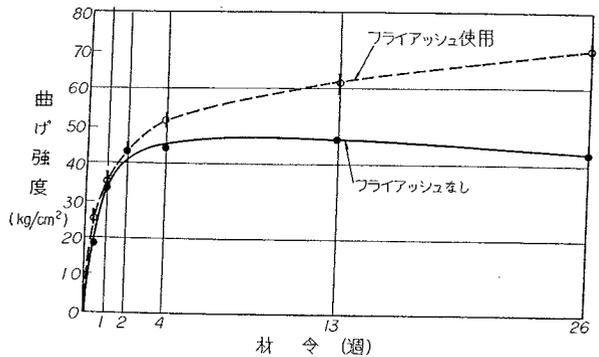


表-3 水中養生期間を変えた場合の材令26週の強度指数 (材令4週水中養生の強度を100とする)

| フライアッシュ 使用の有無 | 水中養生期間 | | | | |
|------------------|--------|----|----|-----|-----|
| | 0日 | 2日 | 6日 | 13日 | 27日 |
| なし | 45 | 61 | 71 | 84 | 88 |
| あり | 60 | 76 | 96 | 116 | 127 |

合と等しくなるような配合を定めてフライアッシュを使用すると用いない場合に比べて特に湿潤養生の期間を長くする必要はなく、かえって養生期間を短かくすることも可能のように思われる。フライアッシュのポズラン反応による強度の増加を十分に利用しようとするためには長期間の湿潤養生が望ましいことはいままでもない。なお本試験全般について乾燥養生の影響が従来の結果とくらべて若干大きく現われているが、これは供試体の寸法が小さかったことによるものと思われる。

5. 考 察

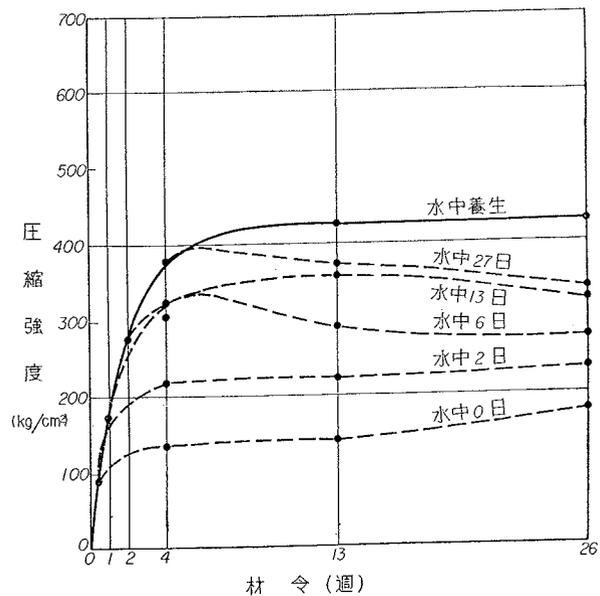
従来の研究によって高炉セメントやシリカセメントのような混合セメントは普通セメントにくらべて養生条件の影響を受けやすいことが認められているが、上述のように本試験の結果よりフライアッシュを混合して使用したコンクリートはこの影響を受けにくくほかの混合セメントとは異なる性質を有することが認められた。

フライアッシュをコンクリートに混合して使用するとその成分中の可溶性シリカが徐々にセメント水和によって生じた水酸化石灰と化合し安定な珪酸石灰塩をつくるものと考えられる。この反応によってコンクリートの強度、耐久性、水密性などが改善されるのであるが、フライアッシュは他のシリカ質混合材にくらべて活性度が低いためこれらの効果は長期材令に至らないと発現されない。また化学分析の結果は材令の長期になっても遊離石灰の量はあまり減少しておらず、ポズラン反応がフライアッシュ粒子のごく表面付近でしか起こらない緩慢な反応であることを示している。

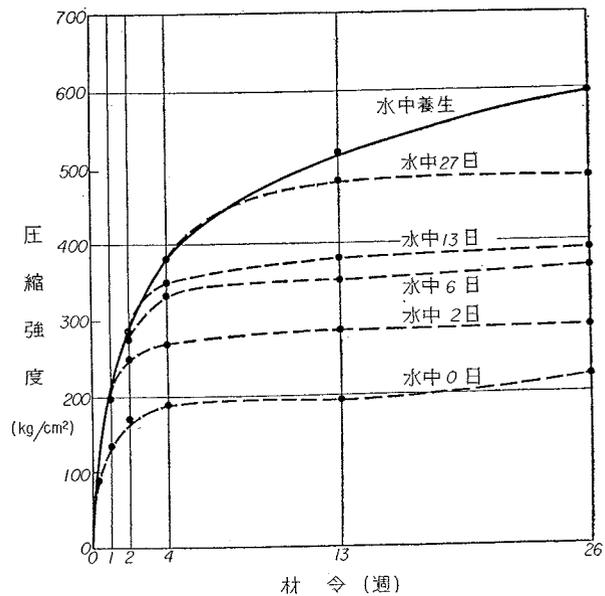
写真—1, 2 および 3 はフライアッシュ 25% を混合したセメントペーストの材令 4 週, 6 週および 20 週における硬化体破面の電子顕微鏡写真の代表的な一例であって、写真中ほぼ球形な凸面または凹面はそれぞれフライアッシュ粒子、あるいはこれがペースト部分より引きはがされたあとのフライアッシュとペーストの接触面を見たものである。

4 週程度の材令初期には 写真—1 の (a), (b) に見られるようにフライアッシュにはほとんど変化が認められないが 6 週に至ると若干変化が生じ、20 週ではこの変化がかなり明瞭なものになっている。このようなフライアッシュの材令にともなう様相の変化はフライアッシュとセメント水和物との化学反応の進行に応じて生じるものと考えられるのであって、4 週以後の長期材令に至ってから徐々に反応が進行することを実証するものと思われる。フライアッシュを用いたコンクリートの強度が用いないものにくらべて養生条件の影響をむしろ受けにくい性質を示したのは、4 週以前の初期材令においてはまだポズラン反応がほとんど起こらないことによるものと考えられる。この試験のように材令 4 週の圧縮強度を目標に配合を定めてフライアッシュを用いると養生条件

図—7 水中養生期間を変えた場合の圧縮強度の変化 (フライアッシュなし)



図—8 水中養生期間を変えた場合の圧縮強度の変化 (フライアッシュを用いた場合 4 種の平均)



のいかにかわかわらず、4 週までの強度は用いないものに劣ることなく、ポゾラン反応が進行を始める長期の材令ではさらに強度が改善されることによりフライアッシュの使用が有利となるものと思われる。

またフライアッシュを用いたコンクリートは $W/C+F$ は減少しているが W/C は大きくなっており、乾燥養生でも強度の増進がよいのはこのためと考えられる。同時にフライアッシュの保水性なども関係しているのではないかと考えられる。

6. 結 論

従来フライアッシュを用いたコンクリートは養生温度が低い場合や、乾燥を受ける場合に強度の低下が大きいのではないかという心配があり、このため舗装コンクリートや一般土木構造用コンクリートなどダム以外の用途に用いることの可否が論ぜられていたが本試験の結果より見て材令 28 日の圧縮強度が等しくなるように単位セメント・フライアッシュ量を増してフライアッシュを用いればフライアッシュを用いたために湿潤養生の期間を特に長くする必要がないこと、養生温度の高低にかかわらずフライアッシュを用いない場合とくらべて強度の発現は少しもおとることなく長期材令ではポゾラン反応の効果がよく発現することが明らかとなった。ダムなどのマスコンクリート以外の一般構造物のコンクリートにフライアッシュを用いる場合、コンクリートの配合を適切に選定することにより、種々の養生条件においてフライアッシュを用いないコンクリートと同程度または、それ以上の強度が得られ、しかもコンクリートの単位水量を減じ、乾燥収縮を少なくするなどのフライアッシュの利点を生かした品質のよいコンクリートが得られると考えられる。

この研究に当り電子顕微鏡写真の提供を受けた佐治健治郎氏の厚意および試験を担当した村田研究員の努力に厚く感謝の意を表する。

写真-1 フライアッシュ混合ペースト硬化体破面の電子顕微鏡写真

倍率：5 000 倍 材令：4 週
 $F/C+F$ ：25% $W/C+F$ ：36%

(a)

(b)

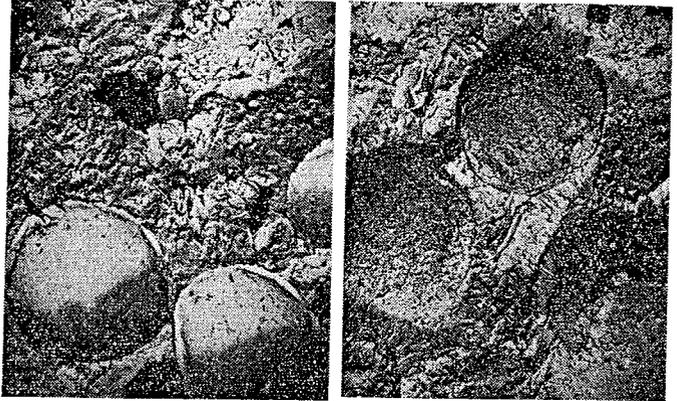


写真-2 フライアッシュ混合ペースト硬化体破面の電子顕微鏡写真

倍率：5 000 倍 材令：6 週
 $F/C+F$ ：25% $W/C+F$ ：36%

(a)

(b)

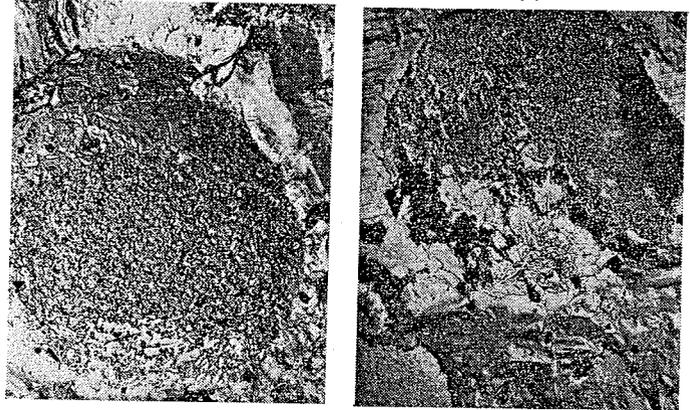
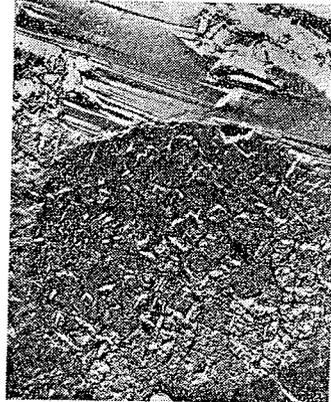


写真-3 フライアッシュ混合ペースト硬化体破面の電子顕微鏡写真

倍率：5 000 倍 材令：20 週
 $F/C+F$ ：25% $W/C+F$ ：36%



参 考 文 献

- 1) 平野・北条：フライアッシュを用いた一般構造用コンクリートの配合設計方法，セメント技術年報昭和 32 年