

## 論文 フライアッシュ置換率40%までのコンクリートの初期性状

船本憲治\*1・松藤泰典\*2・小山智幸\*3・伊藤是清\*4

**要旨**：我が国の石炭灰の発生量は、今後増大することが予想され、環境保護あるいは資源の有効利用の観点から大量かつ有効に利用する方法が求められている。そこで、フライアッシュ置換率40%までのコンクリートを用い、外気温度35℃の暑中環境および20℃の標準環境において、フレッシュ性状・初期強度発現性状を検討するとともに、外気温度5℃の低温環境において、初期強度発現性状を検討した。その結果、フライアッシュを内割使用したコンクリートのせき板存置期間および養生終了時期の目安を提示するとともに、フライアッシュが特に暑中環境対策として有効であることを確認した。

**キーワード**：フライアッシュ、混和材料、スランプロス、脱水量、強度発現性状

## 1. はじめに

全国の石炭火力発電所等から発生する石炭灰の量は現在年間約500万トンを超え、近年のエネルギー事情を反映して今後更に増加し、2010年後には1090万トンに増大すると予測されており、今後、石炭灰は環境保護あるいは資源の有効利用といった観点から、大量かつ有効に利用する方法を確立する時期にきているといえる。

フライアッシュはコンクリート用混和材として、水和発熱の低減や硬化体組織の緻密化等、優れた性質を持つことはよく知られている。但し、フライアッシュをセメントに対して内割で使用する場合には、置換率の増大とともに単位セメント量が減少するため、普通ポルトランドセメント単味の場合と比較して初期強度や中性化に対する抵抗性が低下する。そこで、筆者らは、フライアッシュ置換率40%までのコンクリートを用い、外気温度35℃の暑中環境、20℃の標準環境において、フレッシュ性状、初期強度発現性状並びに型枠脱型時期が強度発現性状に及ぼす影響に関して検討を行った。また、外気

温度5℃の低温環境における初期強度発現性状についても検討し、暑中・標準・低温環境におけるコンクリートのせき板存置期間および養生終了時期の考察を行った。

## 2. 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は老岐産海砂（絶乾比重2.58）、粗骨材は島原西有家産砕石（絶乾比重2.75）を用いた。

フライアッシュの品質は、表-1に示すように、比表面積3,000, 4,000および5,000 $\text{cm}^2/\text{g}$ の3水準を使用した。JISA6201(1999)による区分では、比表面積はすべてフライアッシュII種相当であるが、活性度指数の差によりFA3000がフライアッシュIV種、FA4000およびFA5000がフライアッシュII種に相当している。なお、FA3000とFA5000は石炭灰を捕集する電気集じん装置（EP）の各々のホップから段別捕集したフライアッシュであり、一方、FA4000はフライアッシュを一つのサイロに貯灰し細粉と粗粉に分級する分級装置で分級した後の細粉である。

\*1九州電力株式会社火力原子力建築課副長 工修（正会員）

\*2九州大学大学院人間環境学研究科教授 工博（正会員）

\*3九州大学大学院人間環境学研究科講師 工修（正会員）

\*4九州大学大学院人間環境学研究科院生 工修（正会員）

### 3. 調合条件

調合は、表-2に示すように、水結合材比が40、60%の2水準とし、フライアッシュの内割置換率は0、20、40%の3水準とした。また、混和剤はAE減水剤を用い、目標スランプ18cm・空気量4.5%とした。なお、外気温度は各々35、20、5℃とし、外気湿度はいずれも60%R.H.とし、1ヶ月間恒温恒湿養生を行った。

### 4. 実験概要

外気温度35℃の暑中環境、20℃の標準環境における測定項目は、①スランプの経時変化、②封緘養生した試験体の圧縮強度（材齢1, 3, 5, 7, 10, 28日）、③水中養生した試験体の圧縮強度（材齢3, 5, 7, 10, 28日）、④材齢3, 5, 7, 10まで封緘養生した後、上下面のみ脱型した試験体の脱水性状および28日圧縮強度である。一方、外気温度5℃の低温環境における測定項目は、上記②および③である。

②、③、④ではφ10cm×h20cmの簡易型枠を用い、封緘時には専用の蓋を用いてテープで密封した。また、④では所定材齢で蓋と底板を取り外して各設定環境下に曝し、例えば材齢5日で脱型したものはその時の質量と材齢7, 10, 28

日における質量の差から脱水量を算定し、材齢28日で圧縮強度試験を行った。

## 5. 実験結果および考察

### 5.1 フレッシュ性状

図-1に、外気温度35℃および20℃の環境下におけるスランプの経時変化を示すが、同図は練り上がり直後および所定材齢まで静置した後切り返しを行った直後のスランプ値を示している。両者を比較すると、特に外気温度が高い場合にスランプロスが大きくなっているが、フライアッシュを用いた調合ではいずれの環境においてもセメント単味の調合と比較してスランプロスが低減されている。なお、FA3000およびFA5000についても同様の結果が得られた。

### 5.2 脱水量

初期養生が強度および耐久性性状に与える影響を確認する目的で、図-2および図-3に各環境および調合条件において、打込み後3, 5, 7, 10日で脱型した後の脱水量の経時変化を示す。いずれの調合においても外気温度20℃の場合の方が35℃の場合より材齢10日までの脱水量の増加が大きく、逆に10日から28日までの増加は小さくなる傾向が見られる。これは、温度が低い

表-1 フライアッシュの品質

|               | 強熱減量 (%) | 密度   | 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g) | フロー値比 (%) | 活性度指数 (%) |     | メチレンブルー吸着量 (mg/g) |
|---------------|----------|------|---------------------------|-----------|-----------|-----|-------------------|
|               |          |      |                           |           | 28日       | 91日 |                   |
| FA5000 (EP2列) | 1.1      | 2.36 | 5,060                     | 105       | 82        | 98  | 0.28              |
| FA4000 (分級細粉) | 1.1      | 2.36 | 3,830                     | 108       | 82        | 103 | 0.29              |
| FA3000 (EP1列) | 0.8      | 2.32 | 2,930                     | 102       | 79        | 95  | 0.24              |

表-2 試験体の調合

| 調合番号 | W/(C+F) | F/(C+F) | W/C   | S/a  | 単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |      |      |     | 混和剤量 (×(C+F)) (%) |       |      |       |       |       |    |
|------|---------|---------|-------|------|----------------------------|-----|------|------|------|-----|-------------------|-------|------|-------|-------|-------|----|
|      |         |         |       |      | C                          | W   | F    |      |      | S   | G                 | AE減水剤 |      |       | 補助AE剤 |       |    |
|      |         |         |       |      |                            |     | 5000 | 4000 | 3000 |     |                   | 35℃   | 20℃  | 5℃    | 35℃   | 20℃   | 5℃ |
|      |         |         |       |      |                            |     |      |      |      |     |                   |       |      |       |       |       |    |
| 1    | 40      | —       | 40.0  | 41.7 | 463                        | 185 | —    | —    | —    | 671 | 998               | 0.25  | 0.25 | 0.020 | 0.020 | 0.020 |    |
| 3    |         | 20      | 50.0  | 40.9 | 370                        | 185 | —    | 93   | —    | 648 |                   |       |      | 0.040 | 0.045 | 0.045 |    |
| 5    |         | 40      | 66.7  | 40.9 | 270                        | 180 | —    | 180  | —    | 648 |                   |       |      | 0.050 | 0.050 | 0.045 |    |
| 7    |         | 20      | 50.0  | 40.9 | 370                        | 185 | 93   | —    | —    | 648 |                   |       |      | 0.050 | 0.050 | 0.050 |    |
| 8    |         | 40      | 66.7  | 40.9 | 270                        | 180 | 180  | —    | —    | 648 |                   |       |      | 0.055 | 0.055 | 0.045 |    |
| 2    | 60      | —       | 60.0  | 47.0 | 308                        | 185 | —    | —    | —    | 815 | 982               | 0.25  | 0.25 | 0.010 | 0.005 | 0.015 |    |
| 4    |         | 20      | 75.2  | 46.4 | 246                        | 185 | —    | 62   | —    | 797 |                   |       |      | 0.020 | 0.030 | 0.030 |    |
| 6    |         | 40      | 100.0 | 47.1 | 175                        | 175 | —    | 117  | —    | 820 |                   |       |      | 0.040 | 0.040 | 0.040 |    |
| 9    |         | 20      | 75.2  | 46.3 | 246                        | 185 | —    | —    | 62   | 795 |                   |       |      | 0.015 | 0.015 | 0.015 |    |
| 10   |         | 40      | 100.0 | 46.4 | 180                        | 180 | —    | —    | 120  | 797 |                   |       |      | 0.025 | 0.025 | 0.025 |    |

場合の方が初期の水和が遅れ、その間の水分蒸発が生じるのに対して温度が高い場合には初期の活発な水和反応で水分が消費されることによる。また、同様の理由で置換率が高くなるほどセメント単味の調合よりも脱水量が大きくなっており、これは、初期養生の重要性を示すものである。なお、水結合材比40%の場合でも脱水量の絶対値は半分程度であったが、同様の結果が得られた。

### 5.3 強度発現性状

#### (1) 暑中環境下における検討

図-4~6に、各環境および調合条件下における材齢10日までの初期強度発現性状を示す。

フライアッシュの置換率の増大とともに強度が低くなるが、その差は外気温度が35℃の場合の方が20℃の場合よりかなり小さくなっている。なお、フライアッシュの比表面積による顕著な差は見受けられない。

セメント単味の調合では、外気温度35℃の場合には20℃の場合に比べて、材齢3日までの強度は高く、材齢5日以降の強度は低くなる傾向にある。

フライアッシュを用いた調合では、初期から材齢10日まですべて外気温度35℃の場合の強度が高く、この結果は文献1)とも一致する。これは、通常、フライアッシュの内割置換率が大き

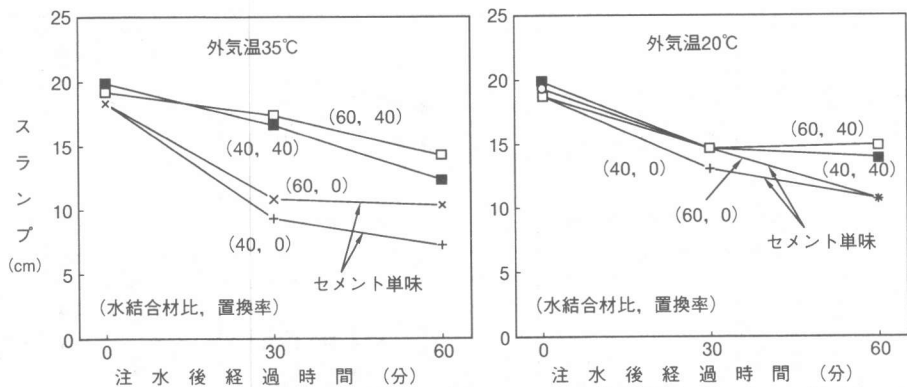


図-1 恒温実験室内における練置き時間とスランプの関係 (FA4000の場合)

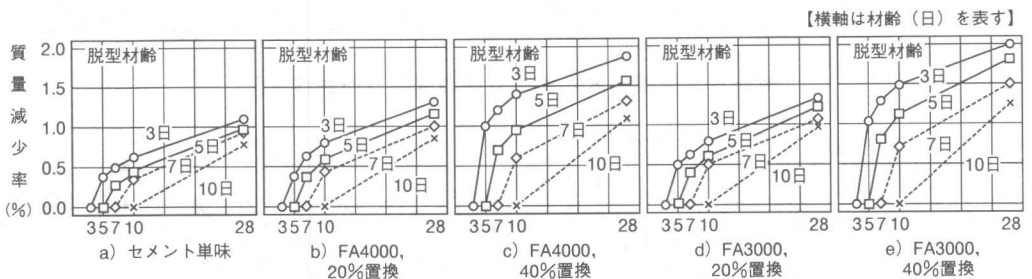


図-2 脱水量の経時変化 (外気温35℃, 水結合材比60%)

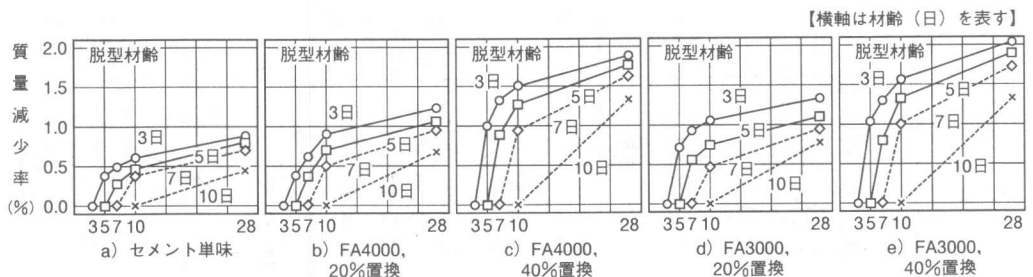


図-3 脱水量の経時変化 (外気温20℃, 水結合材比60%)

くなるのに伴って初期の水和反応速度が小さくなるのに対して、暑中環境下では温度が高いことにより初期から水和が活発になるためである。

図は省略するが、材齢28日においても材齢10日と同様の傾向を示した。

(2) 低温環境下における検討

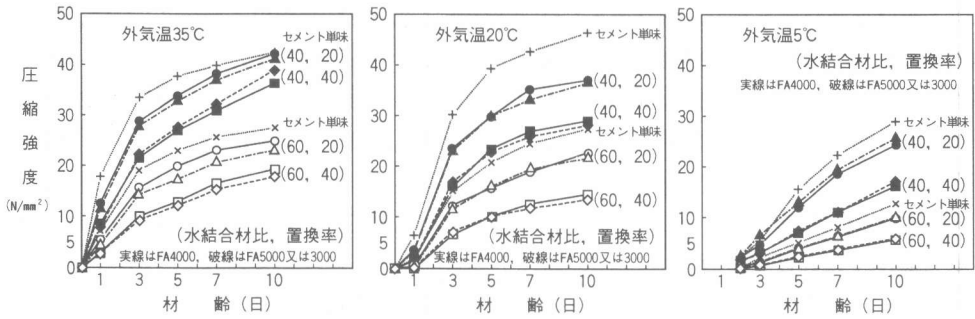


図-4 初期強度の発現性状 (封緘養生)

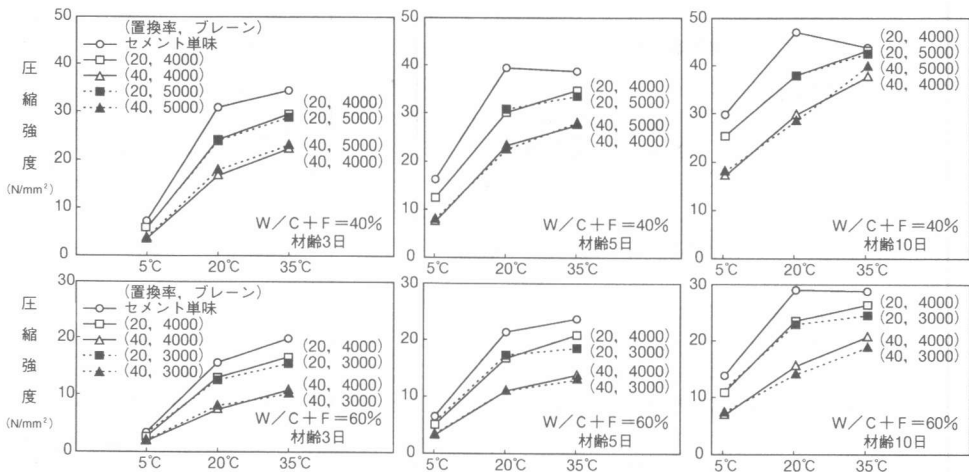


図-5 圧縮強度と養生温度の関係 (封緘養生)

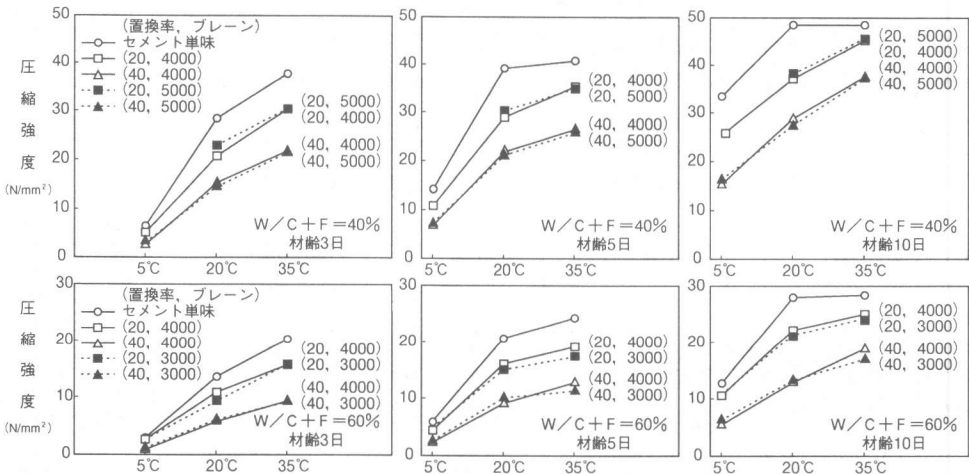


図-6 圧縮強度と養生温度の関係 (水中養生)

図-4～6に、各環境および調査条件下における材齢10日までの初期強度発現性状を示す。

低温環境下では、文献2)等で指摘されているように初期材齢における強度発現は鈍い。また、セメント単味の場合と比較して、フライアッシュの置換率の増大とともに強度が低くなるが、その場合、フライアッシュの比表面積による顕著な差は見受けられない。

### (3) 型枠脱型時期が28日圧縮強度に及ぼす影響

図-7に、外気温度35℃および20℃における型枠脱型時期が28日圧縮強度に及ぼす影響を示す。暑中環境では、特に、置換率が大きい場合に、型枠の存置期間が長いほど強度が高くなる傾向が見られるが、今回検討を行った調査の範囲ではその差は小さい。また、セメント単味の場合と比較して、フライアッシュの置換率の増大とともに強度が低くなるが、その差は外気温度が35℃の場合ではかなり小さくなっている。

暑中環境下では、フライアッシュを内割置換することによりコンクリートの温度上昇の低減が可能であり、また、フライアッシュを高い置換率で用いても強度低下が小さいと言える。

### 5.4 予想平均気温によるコンクリート強度補正値の検討

構造体コンクリートの強度管理の材齢を28日として調査強度を定めるには、予想平均気温によるコンクリート強度の補正値Tを定める必要があり、図-8に今回の実験で求められた水中養生における補正値を示す。

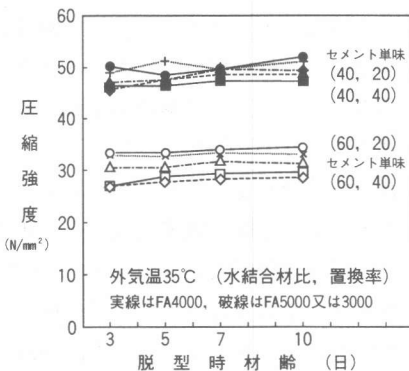


図-7 脱型時材齢と28日圧縮強度

コンクリートの強度発現に及ぼす養生温度の影響は非常に大きく、養生温度が低いとコンクリートの強度発現は小さくなるが、低温環境下での今回の実験による補正値Tは文献3)のフライアッシュセメントB種の補正値に比べて大きくなっている。なお、低温環境下ではフライアッシュの有無・種類・置換率によって最大5N/mm<sup>2</sup>程度の差はあるが、明確な傾向は見受けられなかった。

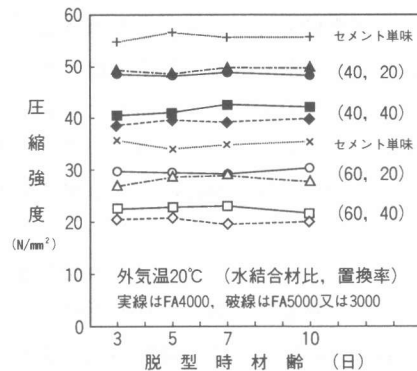
一方、暑中環境下では、フライアッシュの有無により顕著な差が生じており、フライアッシュの置換率の増大に伴うコンクリートの強度発現が大きくなっており、コンクリート強度の補正値Tはマイナスの値になっている。このことは、フライアッシュが暑中環境対策として積極的に利用できることを示している。

### 5.5 せき板存置期間および養生終了時期に関する考察

圧縮強度が、文献3)におけるせき板取り外しの目安である5N/mm<sup>2</sup>、同じく湿潤養生終了の目安である10N/mm<sup>2</sup>に達する材齢を封緘養生の供試体で評価し表-3および表-4に示す。その結果、外気温度が高いほど、置換率が低いほど上記強度に達する材齢は短くなっているが、比表面積について明瞭な差は見受けられなかった。

### 6. 結論

JIS規格におけるフライアッシュII種相当を使用したフライアッシュ置換率40%までのコンクリートに関して外気温度35℃、20℃、5℃の



検討を行い、下記の結論を得た。

- (1) フライアッシュを用いた調合では、いずれの環境（外気温35℃、20℃）においてもセメント単味の調合と比較してスランプリロスが低減できる。
- (2) フライアッシュ置換率が高くなるほど初期の水和の遅れの影響により、セメント単味の調合よりも脱水量が大きくなる。
- (3) 暑中環境下（外気温35℃）でフライアッシュを使用しない調合では、材齢5日以降は強度増進が小さくなるため、外気温20℃の場合に比べて強度が小さくなる傾向にある。一方、暑中環境下でフライアッシュを使用する調合では、初期から材齢28日まで外気温20℃の場合に比べて強度が大きくなる。このことは、フライアッシュが暑中環境対策として有効であることを示している。
- (4) 低温環境下（外気温5℃）では初期材齢における強度発現は鈍く、フライアッシュ置換率の増大とともにその強度はさらに低くなる。
- (5) 予想平均気温によるコンクリート強度の補正值は、低温環境下ではJASS5の値より幾分大きめになった。一方、暑中環境下では、フライアッシュの有無により顕著な差が生じており、フライアッシュの置換率の増大に伴いコンクリートの材齢28日における強度発現が大きくなっている。
- (6) 今回の実験により、コンクリートのせき板存置期間および養生終了時期の目安を提示できた。なお、上記材齢は外気温が高いほど、フライアッシュ置換率が低いほど短くなって

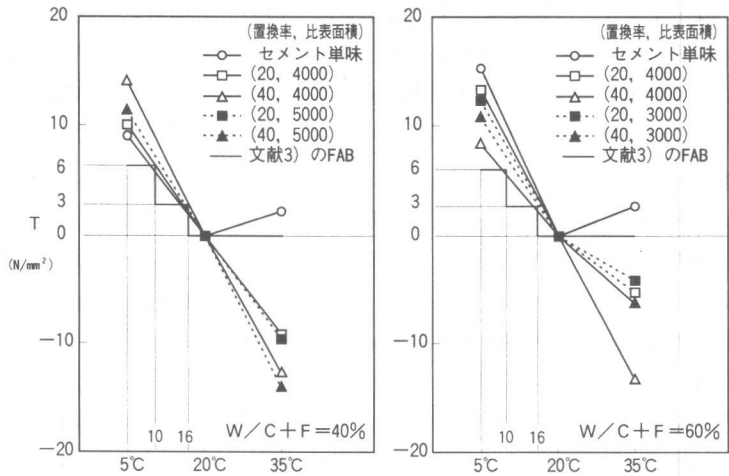


図-8 平均気温によるコンクリート強度の補正值(管理材齢28日水中養生)

表-3 圧縮強度が5N/mm<sup>2</sup>に達する材齢

| W/B (%) | 置換率 (%) | 外気温度 (°C) | 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g) |       |       |
|---------|---------|-----------|---------------------------|-------|-------|
|         |         |           | 3,000                     | 4,000 | 5,000 |
| 40      | 0       | 35        | 1                         |       |       |
|         |         | 20        | 1                         |       |       |
|         |         | 5         | 2~3                       |       |       |
|         | 20      | 35        | -                         | 1     | 1     |
|         |         | 20        | -                         | 1~2   | 1~2   |
|         |         | 5         | -                         | 3~4   | 3~4   |
| 40      | 35      | -         | 1                         | 1     |       |
|         | 20      | -         | 1~2                       | 1~2   |       |
|         | 5       | -         | 4~5                       | 4     |       |
| 60      | 0       | 35        | 1                         |       |       |
|         |         | 20        | 1~2                       |       |       |
|         |         | 5         | 5                         |       |       |
|         | 20      | 35        | 1                         | 1     | -     |
|         |         | 20        | 1~2                       | 1~2   | -     |
|         |         | 5         | 5~6                       | 5~6   | -     |
|         | 40      | 35        | 1~2                       | 1~2   | -     |
|         |         | 20        | 2~3                       | 2~3   | -     |
|         |         | 5         | 8                         | 8~9   | -     |

表-4 圧縮強度が10N/mm<sup>2</sup>に達する材齢

| W/B (%) | 置換率 (%) | 外気温度 (°C) | 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g) |       |       |
|---------|---------|-----------|---------------------------|-------|-------|
|         |         |           | 3,000                     | 4,000 | 5,000 |
| 40      | 0       | 35        | 1                         |       |       |
|         |         | 20        | 1~2                       |       |       |
|         |         | 5         | 4                         |       |       |
|         | 20      | 35        | -                         | 1     | 1     |
|         |         | 20        | -                         | 1~2   | 1~2   |
|         |         | 5         | -                         | 5     | 5     |
| 40      | 35      | -         | 1~2                       | 1~2   |       |
|         | 20      | -         | 2~3                       | 2~3   |       |
|         | 5       | -         | 6~7                       | 6~7   |       |
| 60      | 0       | 35        | 1~2                       |       |       |
|         |         | 20        | 2~3                       |       |       |
|         |         | 5         | 8                         |       |       |
|         | 20      | 35        | 2                         | 2     | -     |
|         |         | 20        | 2~3                       | 2~3   | -     |
|         |         | 5         | 10                        | 10    | -     |
|         | 40      | 35        | 3~4                       | 3     | -     |
|         |         | 20        | 5                         | 5     | -     |
|         |         | 5         | 25                        | 24    | -     |

いるが、比表面積については明瞭な差が見受けられなかった。

【謝辞】 本研究は日本建築学会材料施工委員会フライアッシュ調査研究小委員会における一連の研究の一環として行ったものである。

【参考文献】

- 1) 森永繁ほか：フライアッシュを使用するコンクリートの暑中環境下における物性に関する研究（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，PP. 53~54，1997.9
- 2) 鎌田英治ほか：フライアッシュを用いたコンクリートの凝結と強度発現，日本建築学会大会学術講演梗概集，PP. 49~50，1997.9
- 3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，1997