

八幡化学工業株式会社

正員 阪本好史

正員 冨沢年道

正員 森山啓州

## 1 はじめに

近年、高炉スラグの潜在水硬性、フライアッシュのポゾラン反応という特性を利用して、それぞれセメント用の混和材として広く用いられており、またそれらに関する研究報告も数多くみられる。

従来コンクリートの配合設計においては、混和材を含んだものをセメントと考えると強度とセメント・水比の関係が用いられてきたが、昭和41年10月に刊行された「プレパツドコンクリート施工指針案」土木学会の解説では、一般的に混和材の混和によって短期強度の増大を期待するのが困難であるので短期強度(28日)は水とセメント質との重量比(%)で定めるのが適当であり、長期強度(91日)は水結合材比(%) $\pm$ Fを用いるのがよいという新しい考え方が導入された。ただし良質の混和材であれば特にセメント質と区別して考えなくてよいと解説されている。

そこでここでは最近の高炉スラグ、フライアッシュを混和したセメント試料のモルタル・ペーストについて強度試験を行ない混和材の強度発現性について再検討したものである。

## 2 JISモルタルの圧縮強さ

## (1) 使用材料

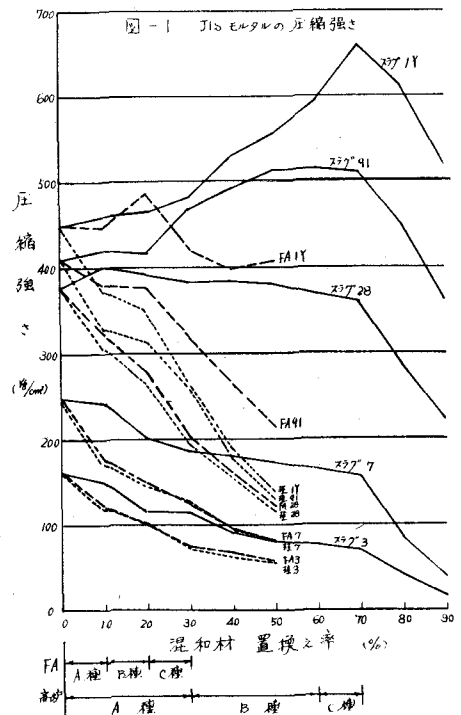
この試験で用いたセメントは普通ポルトランドセメントで、混和材としてスラグ(グリーン3800  $\text{cm}^3/\text{gr}$ )、フライアッシュ(グリーン2860  $\text{cm}^3/\text{gr}$ )と標準砂を粉砕した珪砂粉末(グリーン3700  $\text{cm}^3/\text{gr}$ )を用いた。細骨材は豊浦標準砂である。

## (2) 試験方法

セメント試料はスラグの場合セメントに対し内割(重量比)で10%刻みに90%まで混合したもの、フライアッシュと珪砂粉末の場合は同様にして50%まで混合したもので、JISモルタルを作成し、標準養生して各材令における強度を測定した。

## (3) 結果および考察

試験結果は図-1に示す通りである。非反応性の珪砂粉末を混合したものは、いずれの材令においても混合量が増すとほぼ直線的に強度が低下するのに対して、スラグまたはフライアッシュを混合したものは珪砂粉末に比べて材令が経過するにつれて強度の大きくなるのが認め



られる。さらにフライアッシュのボゾラン反応は材令28日までには殆んど進行せず、91日以降においてその効果が大きい。のに対して、スラグの潜在水硬性は材令3日から徐々に発揮されており、材令28日以降の効果が特に大きい。

ここでスラグとフライアッシュの強度発現性を比較するために Keil<sup>1)</sup> の P H I (Principal Hydraulic Index) を求めてみると表-1 に示す通りである。

$$P H I = \frac{a - c}{b - c} \times 100$$

a: ポルトランドセメントと混和材を加えたセメントの強さ

b: ポルトランドセメントの強さ

c: ポルトランドセメントに a と同じ割合で天然珪砂粉を混合したセメントの強さ

P H I は大きいほど硬化性のよいことを示すもので 100 の場合はポルトランドセメントと混和材の硬化性の等しいことを意味している。表-1 のように高炉スラグの場合は材令3日で 21.7 ~ 73.2, 7日目で 48.8 ~ 91.9 を示し、28日以降は 100 以上の P H I を示したのに対し、フライアッシュの場合は材令3日、7日目で殆んど 0 に近い値で、材令91日以降になると P H I は大きくなることが認められる。

以上のようにスラグとフライアッシュが同じ混合量であれば、ボゾラン反応よりも潜在水硬性の方が反応が速いので、強度発現性は良好であるが、JIS で定められた混合セメント A, B, C 種と比較すると、同じ種別でもスラグの方がフライアッシュの混合量よりも多いので、実用的にはスラグとフライアッシュで大差なく、今回の試験結果ではスラグの方がフライアッシュよりも同じかや、良い程度であった。

表-1 Keil P H I

| 混和材                         | 材令 (%) | 3日   | 7日   | 28日   | 91日   | 1年    |
|-----------------------------|--------|------|------|-------|-------|-------|
| ス<br>ラ<br>グ                 | 10     | 73.2 | 91.9 | 135.7 | 111.0 | 113.0 |
|                             | 20     | 23.3 | 54.0 | 114.5 | 105.2 | 116.3 |
|                             | 30     | 46.6 | 48.8 | 103.3 | 137.3 | 117.3 |
|                             | 40     | 27.3 | 55.8 | 103.6 | 136.0 | 131.0 |
|                             | 50     | 21.7 | 54.2 | 104.5 | 136.2 | 134.6 |
|                             | 平均     | 38.4 | 60.9 | 111.7 | 125.1 | 122.4 |
|                             |        |      |      |       |       |       |
| フ<br>ラ<br>イ<br>ア<br>ッ<br>シュ | 10     | 4.9  | 4.1  | 22.9  | 59.8  | 96.1  |
|                             | 20     | —    | 1.0  | 10.9  | 75.6  | 138.8 |
|                             | 30     | 2.3  | 1.6  | 4.9   | 39.9  | 85.4  |
|                             | 40     | —    | 1.3  | 2.3   | 38.6  | 80.5  |
|                             | 50     | 0.9  | —    | 1.9   | 30.5  | 87.2  |
|                             | 平均     | 1.6  | 1.6  | 8.6   | 48.9  | 97.6  |
|                             |        |      |      |       |       |       |

### 3. プレパックドコンクリート用注入モルタルの圧縮強度

#### (1) 使用材料

この試験で用いた材料は下記の通りである。

セメント: 普通ポルトランドセメント、高炉セメント A 種、B 種、C 種

混和材: フライアッシュ (比重 2.19 プレーン 3640 <sup>cm<sup>3</sup></sup>/t) 珪砂粉末 (比重 2.60 プレーン 3700 <sup>cm<sup>3</sup></sup>/t)

細骨材: 粗粒率 1.88 の砂

混和剤: なし

#### (2) 試験方法

モルタルの配合条件は下記の通りである。

フライアッシュ、珪砂粉末混合率: セメント重量に対し内割 20, 40, 60 %

砂セメント比 (S/C+F): 1.0 1.5 2.0

目標フロー: 16 ± 1 秒 (P ロート)

以上のような配合条件で、グラウト試験用攪拌装置(丸東社製C94-4)により試験用注入モルタルの練り混ぜ方法(港研案)に準じて練り混ぜて4×4×16cmの供試体を作成した。養生方法は、定材令まで20℃水中養生を行った。

### (3) 結果および考察

試験結果は図-2に示す通りである。なお図-2に示したセメント水比のセメントは各種混和材を含まないポルトランドセメントである。したがって同一セメント水比のとき、珪砂粉末混合のものとの強度とスラグまたはフライアッシュ混合のものとの強度差が潜在水硬性またはポゾラン反応によるものであるといえる。

図-2に示すようにフライアッシュの場合材令28日までは非反応性の珪砂粉末の強度と同じような強度であるが、材令91日になると両者の差がかなり明確であるところから、ポゾラン反応は材令28日から91日にかけて著しく進行するといえよう。一方スラグの潜在水硬性は材令3日、7日において多少ではあるが発揮されており材令28日以降において特に顕著である。

ここでスラグ・フライアッシュの場合について圧縮強度、混和材量、砂セメント比、セメント水比を要因に取り上げ、重回帰分析を行った結

図-2 セメント水比と圧縮強度

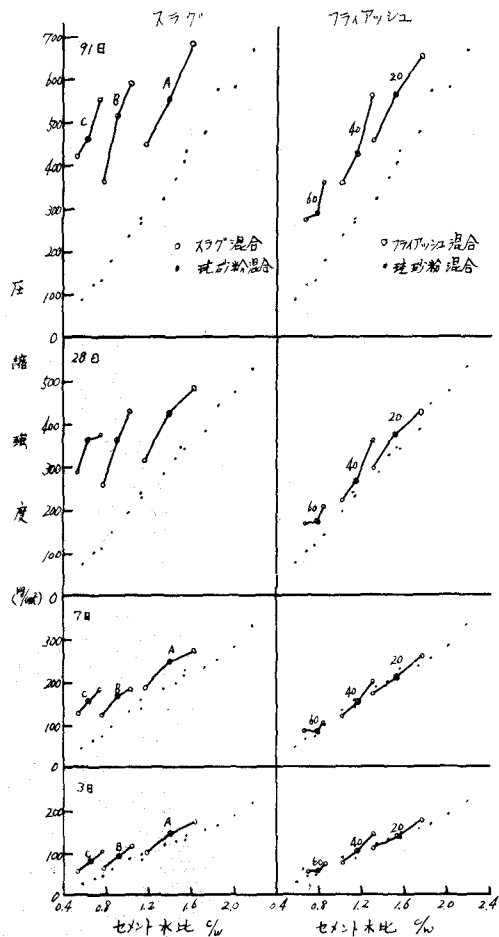


表-2 圧縮強度( $y$ )と混和材量( $x_1$ )・砂セメント比( $x_2$ )・セメント水比( $x_3$ )の関係

| 混和材     | 各材令における<br>圧縮強度<br>( $y$ ) | 単相関係数の検定   |            |            | 単回帰式の推定                |      | 重回帰式の推定 | 重回帰式の推定                                    |      | 寄与率の推定  |
|---------|----------------------------|------------|------------|------------|------------------------|------|---------|--------------------------------------------|------|---------|
|         |                            | $r_{x_1y}$ | $r_{x_2y}$ | $r_{x_3y}$ | 単回帰式                   | 回帰係数 |         | 重回帰式                                       | 回帰係数 |         |
| スラグ     | $\sigma_3$ (%)             | 0.83490    | 0.50270    | 0.96121    | $y = 88.4x_3 + 10.8$   | 12.9 | 0.98605 | $y = 0.01x_1 - 22.9x_2 + 88.8x_3 + 48.2$   | 8.2  | 0.96970 |
|         | $\sigma_7$ (%)             | 0.83506    | 0.46482    | 0.94922    | $y = 114.9x_3 + 69.2$  | 19.4 | 0.98675 | $y = 0.18x_1 - 24.5x_2 + 116.6x_3 + 98.0$  | 16.4 | 0.92847 |
|         | $\sigma_{28}$ (%)          | 0.51764    | 0.77728    | 0.75356    | $y = 114.5x_3 + 249.5$ | 50.9 | 0.95207 | $y = 2.05x_1 - 72.7x_2 + 187.9x_3 + 205.1$ | 24.5 | 0.89767 |
|         | $\sigma_{91}$ (%)          | 0.36619    | 0.86456    | 0.61648    | $y = 128.3x_3 + 373.1$ | 83.6 | 0.93645 | $y = 0.27x_1 - 192.5x_2 + 67.4x_3 + 743.3$ | 38.3 | 0.85440 |
| フライアッシュ | $\sigma_3$ (%)             | 0.85456    | 0.44696    | 0.97317    | $y = 108.0x_3 + 19.9$  | 11.5 | 0.98022 | $y = 0.18x_1 - 110.4x_2 + 113.6x_3 + 15.5$ | 10.2 | 0.95715 |
|         | $\sigma_7$ (%)             | 0.90405    | 0.36687    | 0.98628    | $y = 171.6x_3 + 43.1$  | 72.0 | 0.98680 | $y = 0.87x_1 - 12.4x_2 + 50.0x_3 + 5.3$    | 13.1 | 0.97130 |
|         | $\sigma_{28}$ (%)          | 0.85504    | 0.43312    | 0.97878    | $y = 245.7x_3 + 5.3$   | 21   | 0.98663 | $y = 0.88x_1 - 68.2x_2 + 281.4x_3 + 52.5$  | 19.0 | 0.97043 |
|         | $\sigma_{91}$ (%)          | 0.75418    | 0.54860    | 0.91973    | $y = 273.2x_3 + 109.5$ | 32.7 | 0.95291 | $y = 1.75x_1 - 48.0x_2 + 33.7x_3 + 11.4$   | 42.0 | 0.89442 |

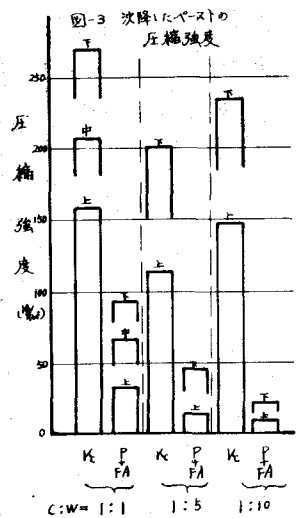
表は表-2に示す通りである。まず圧縮強度とセメント水比の関係を単相関係数でみてみると、いずれも危険率1%で有意ではあるが、スラグの場合材令28日以降は急激に小さくなっており両者の関係が小さくなっていることがわかる。スラグ混合量についても負相関であるが同様の傾向が認められるということは潜在水硬性の効果が大きいことを意味している。一方フライアッシュの場合のセメント水比、フライアッシュ混合量の単相関係数は各材令とも大きな値を示しており、ポズラン反応の効果の小さいことを意味している。また混和材料、砂セメント比、セメント水比を要因に取り上げ圧縮強度を推定すると比較的精度よく推定することができる。

以上のように本試験で用いたスラグの場合はすでに材令28日で潜在水硬性が充分発揮されており水セメント比、水結合材比と区別して考える必要はないと思はれる。

#### 4 ペーストの圧縮強度

(1) 試験方法 セメント試料は高炉セメントC種と普通ポルトランドセメントを内割で30%混合したもので、配合はセメント対水を1:1, 1:5, 1:10とした。グラウト用ミキサで練り混ぜた後土木学会の注入モルタルのグリーンアップ率および膨脹率試験方法<sup>2)</sup>に従って試験した。その後水中に静置しておき、材令14日目にはそれぞれ上、中、下層部分から一辺の長さ1~2cmの立方体状の供試体を切り出して圧縮強度試験を行なった。

(2) 結果および考察 図-3に示すようにいずれのセメント配合でも上部より下部の方が強度の大きいのは、締め固まりの程度の差によるものと考えられるが、高炉C種とフライアッシュ30%混合のもの比べてみると予想以上の強度差を示している。これは初期材令でもスラグとフライアッシュの反応性の相違ということが影響していると考えられるが、その他にスラグとフライアッシュの比重の相違も締め固まりの程度に影響しているのではないと思はれる。



#### 5. まとめ

以上のようにスラグとフライアッシュの強度発現性はそれぞれ特徴がみられる。すなわちスラグの潜在水硬性は初期材令から除々に発揮され材令28日以降において特に顕著であるのに対して、フライアッシュのポズラン反応は材令28日まででは殆んど進行せず91日以降になって著しい。しかし実用的にはスラグとフライアッシュの混合量が異なるので、両者の差は少ないと思はれる。また地盤注入グラウト材料など特殊な用途のときは、スラグの方が強度の面で有利である場合もあるので、各用途毎に要求される特殊条件に応じて材料の選択をするのが賢明な策であると思はれる。

1) F. Keil "Slog Cement" Proceedings of the Third International Symposium on the Chemistry of cement, London, 1952.

2) 赤塚雄三 "プレバックドコンクリート" コンクリートパンフレット 第75号