

論文

[1021] 三成分系セメントの混合比率がペーストの特性に及ぼす影響

大下 健二*1・魚本 健人*2

1. はじめに

高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどの混和材料を用いたコンクリートは、水和発熱による温度ひび割れの抑制などコンクリートの諸性能を改善する効果があるとされている[1]。これらの混和材料はセメントとの混合により反応性を発揮するものである。したがって、セメントとの混合には適正な混合範囲があり混合セメントのJIS規格(JIS R 5211、5213)にも混合比に制限が設けられている。しかしながら、これらの範囲を越えた多種類の混和材料を併用した三成分系セメントに高性能減水剤を加えた超流動コンクリートが注目されているが、混和材混合比は同一ではなく、混合比による影響や流動性を左右する高性能減水剤の使用量による影響は十分には明らかにされていない。そこで本研究では、超流動コンクリートに用いられる低水結合材比の配合でセメントに高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した低発熱三成分系セメントを対象として、様々な混合比のペーストの性状から反応性混和材の混合比の影響および高性能減水剤の影響を実験的に明らかにしたものである。

2. 三成分系セメントの混合比の影響 (実験1)

2-1 実験概要

実験は、高性能減水剤の影響を小さくする為に全ての結合材(以下Pと略す)に対する高性能減水剤の使用量を一定とした。

(1) ペースト配合および練混ぜ方法

実験に用いた結合材は普通ポルトランドセメント(以下OPCと略す)、高炉スラグ微粉末(以下高炉スラグと略す)およびフライアッシュそれぞれの使用材料の化学成分を表-1に、またペースト配合を表-2に示す。ペーストの配合は水結合材比25.0%(高性能減水剤の乾燥固形分を除いた実際の水セメント比は24.4%)で一定とし、高性能減水剤の添加量は2.0%/Pで

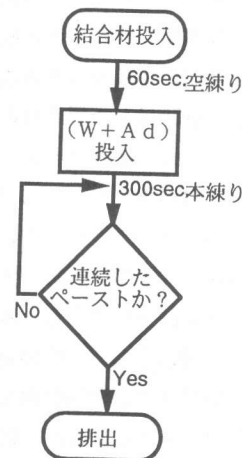


図-1 練混ぜ方法

表-1 材料の化学成分

材料	化学成分値	比重	比表面積 (cm ² /g)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)
普通ポルトランドセメント		3.15	3300	21.5	5.3	3.0	64.8	1.6	2.0
高炉スラグ微粉末		2.89	6260	30.6	13.2	0.3	43.1	6.1	2.1
フライアッシュ		2.24	3060	56.7	27.9	2.8	5.1	1.2	1.0

表-2 ペースト配合

W/P (%)	Ad** (%)	** アミノカルボン酸系 高強度配合用 高性能減水剤 (乾燥固形分30%)
25	2.0	

*1 藤沢薬品工業株式会社 筑波コンクリート研究所、(正会員)

*2 東京大学教授 生産技術研究所 第5部、工博(正会員)

すべて一定とした。練混ぜ方法を図-1に示す。練混ぜ方法は、ホバート型ミキサ（容量：30l）に結合材を投入した後 60秒間空練りを行い、水投入後 300秒間練り混ぜた。ただし、連続体とならない場合には 300秒ごとに状態を目視で確認し連続体となるまで練り混ぜた。

(2) 結合材混合比

結合材混合比を図-2に示す。結合材混合比は次のことを考慮した。高炉スラグおよびフライアッシュなどの混和材はセメントの水和により生成する水酸化カルシウムと反応し強度に寄与する。したがって、これらの混和材とセメントの比率が混和材の反応に影響し強度などの硬化体の物性値に影響を与えることとなる。混和材を一種類のみを混合する場合には混合セメントの J I S 規格(JIS R5211,5213)により混合率に制限があり、図中の領域1では混和材に対するセメント量は十分であると考えられる。領域1と領域2の境界線は、高炉スラグ70%置換セメントとフライアッシュ30%置換セメントを任意に混合した場合である。以上を考慮し、現在までに報告されている三成分系セメントを使用した例[2][3][4]での混合比を網羅し、また高炉スラグおよびフライアッシュの混合比が現行 J I S での最大混合比を20%越える(高炉スラグ90%、フライアッシュ50%)までの範囲を対象とすることとした。(領域2)

(3) 試験項目

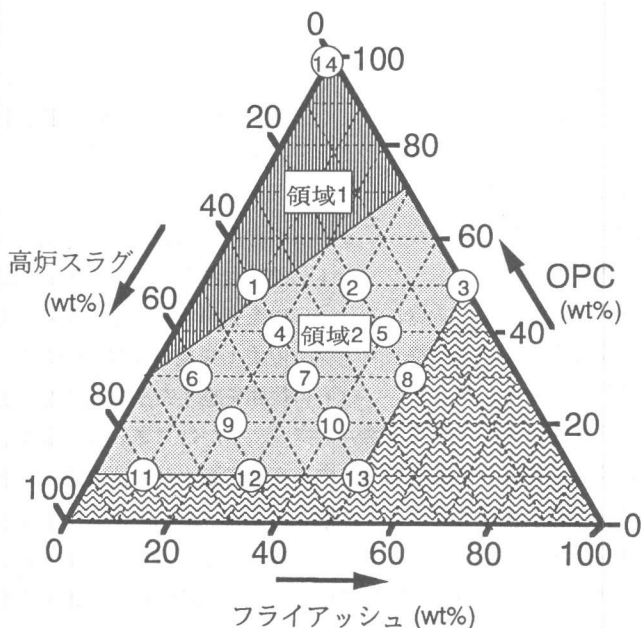


図-2 結合材混合比

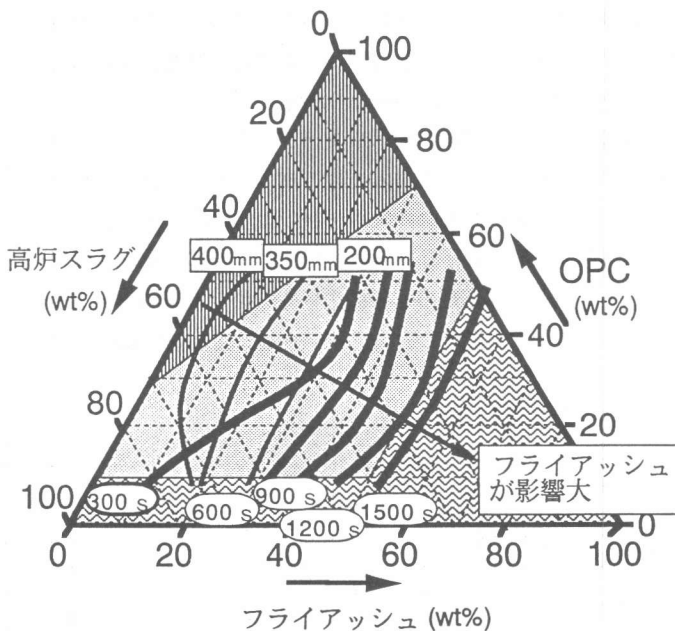


図-3 β -テストロー値（練混ぜ時間300sec.）と練混ぜに要した時間

試験項目を以下に示す。

練混ぜ直後 ○ペーストフロー試験：上面直径 70mm, 下面直径 100mm, 高さ 60mm のコーンを使用した。

硬化後 ○圧縮強度試験：
φ5×10cm の供試体を成形し、環境温度 20°C で封緘養生とした。

2-2 結果および考察

練り時間 300秒で練混ぜ可能であったペーストフロー値と連続体とする為の要した時間を図-3に示す。この結果はフライアッシュ量が練混ぜ性能に著しく影響することを示している。圧縮強度試験結果を図-4（材令7日）および図-5（材令28日）に示す。いずれの結果からもOPC量と高炉スラグ量が等しい混合比で強度の変曲点が認められた。また、OPC量が高炉スラグ量より多い混合比ではフライアッシュ量が強度に対して影響が大きく、一方OPC量が高炉スラグ量より少ない混合比ではOPC量が強度に対して影響が大きい。

以上の結果から、混和材の強度に対する影響を以下のように考察した。OPC量が高炉スラグ量より多い場合には、フライアッシュ量が増加するにしたがい強度は低下している。これよりフライアッシュの強度に対する寄与は他の結合材に比較して小さいことがわかる。したがって、材令28日まではフライアッシュが強度に寄与せず、強度はOPCと高炉スラグにより発現していると考えられる。石川らは断熱温度上昇量と高炉スラグの置換率との関係を調べ、粉末度6000cm²/gでは置換率50%付近に極大値を示すことを明らかにしている[5]。これは高炉スラグの置換率が大き過ぎるとセメントからのア

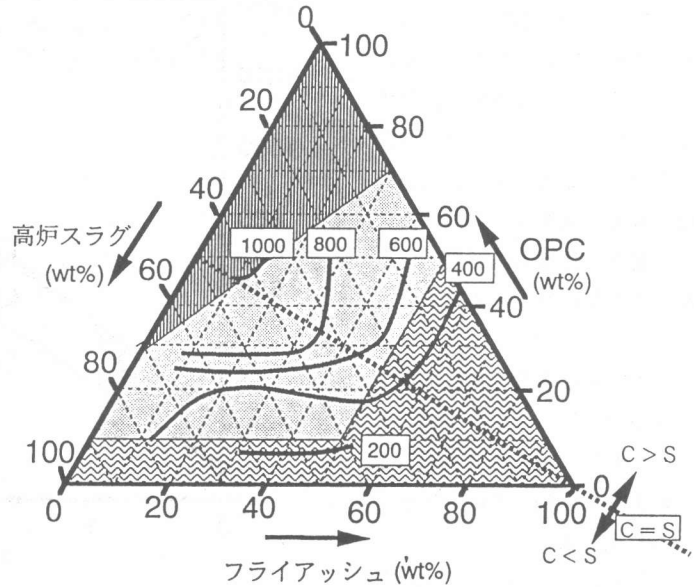


図-4 材令7日圧縮強度(kgf/cm²)

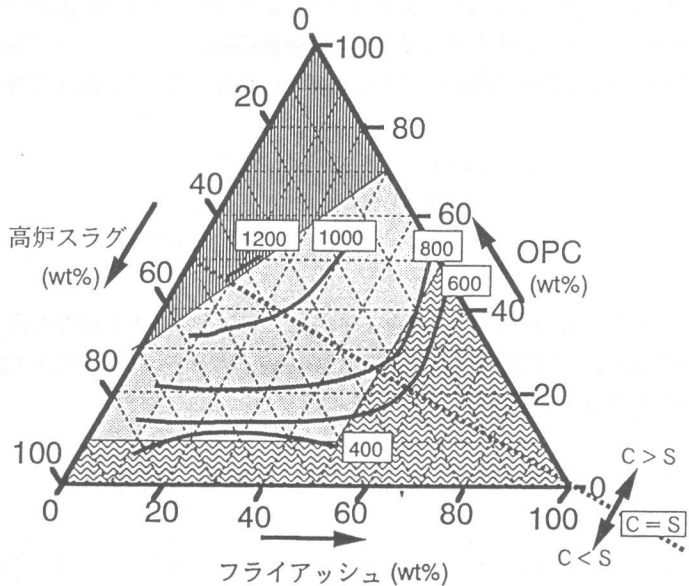


図-5 材令28日圧縮強度(kgf/cm²)

ルカリ刺激が不足し反応が進行しないことを示している。今回の実験結果でも同様にOPCと高炉スラグが等量の時に強度の変曲点が認められ、OPC量が高炉スラグ量より少ない場合にはアルカリ刺激が不足し、セメント量が一定ならば強度がほとんど変化しなかったと推定される。

これらのことを考慮して以下の仮定を設ける。

- 1) 混和材の混合によりOPCの水和生成物および反応速度は変化しない。
- 2) 高炉スラグの反応には等量以上のOPCが必要である。
- 3) フライアッシュは強度に寄与しない。

以上の仮定が成り立ち、またOPCと高炉スラグが等量の時のおおのが発現する強度値がほぼ同一ならば、反応に寄与する結合材量と強度には、コンクリートに適用されているセメント水比と強度の関係と同様な関係が成立すると考えられる。そこで、反応に寄与する結合材量を P' は、

$$C \geq S \text{ の時 } P' = C + S$$

$$C < S \text{ の時 } P' = 2C$$

P' : 反応結合材量、 C : OPC量、 S : 高炉スラグ量

これを反応結合材水比と強度の関係としてプロットした結果を図-6に示す。この関係には相関が認められ、上記の仮定がほぼ正しく三成分系セメントの強度則と混和材の反応率をある程度まで説明できる結果となった。

3.高性能減水剤の使用量による影響 (実験2)

3-1 実験概要

低水結合材比の領域で三成分系セメントを使用すると、凝結が異常に遅れることが報告されている。この原因として高性能減水剤の影響が考えられる。高性能減水剤の最大の使用目的は流動性を高めるためであり、流動性のみを考えれば全結合材(粉体の総量)に対して添加することとなる。しかしながら、コンクリートの硬化時間や強度が予測できなければ、フレッシュ時の作業性に反して、硬化後の作業性は低下する可能性が考えられる。そこで三成分系セメント使用時における高性能減水剤の添加量による影響を、高性能減水剤を一定とした実験1と比較することにより実施した。

実験の方法および試験項目は実験1に準拠した。ただし、高性能減水剤の結合材に対する添加量

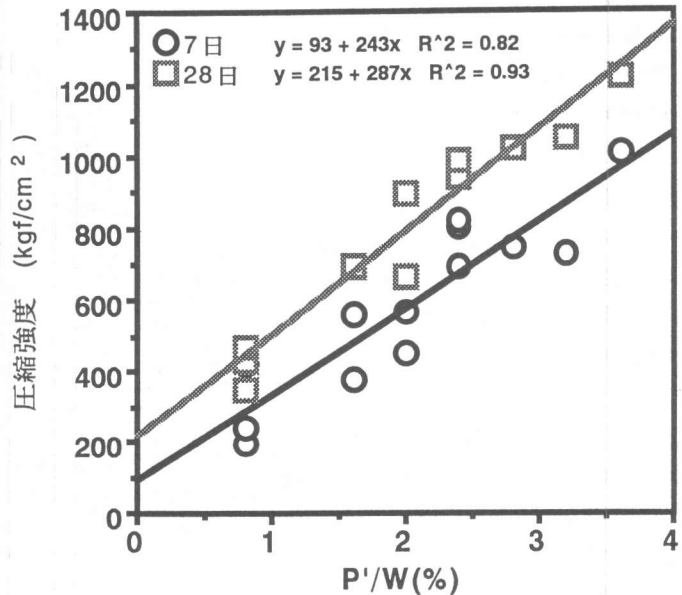


図-6 反応結合材比と圧縮強度の関係

は最大6%/Pまでとし、6%/P添加しても連続体とならない場合には300秒ごとに状態を目視で確認し連続体となるまで練り混ぜた。また、練混ぜ直後のペーストのフロー値は 350 ± 30 mmの範囲とした。

3-2 結果および考察

高性能減水剤の添加量と練混ぜに要した時間を図-7に示す。実験1での傾向と同様にフライアッシュ量に比例して練混ぜ性能が悪くなり、フライアッシュ量が30%程度以上になると高性能減水剤を6%/P添加しても300秒では連続体とすることは不可能であった。圧縮強度の試験結果を図-8(材令3日)、図-9(材令7日)および図-10(材令28日)に示す。材令初期においてOPC量が少なく、高性能減水剤量が多い領域では硬化が著しく遅れ、材令が7日で未硬化のものさえある。材令28日ではすべての混合比で硬化した。この結果を実験1と比較すると材令7日で強度が低くても材令28日で極めて高強度となるものもある。この現象の原因として高性能減水剤が混和材の反応性に影響を与える、もしくは硬化が遅れ沈下量が増しペースト中の空隙が減少する等が考えられる。高性能減水剤の添加量を増加することで強度性状は大きく変化し、実験1で得られた強度則の適用はできない結果となった。図-10にみられるように、若干の混合比の変化でも強度が大きく異なるようである。

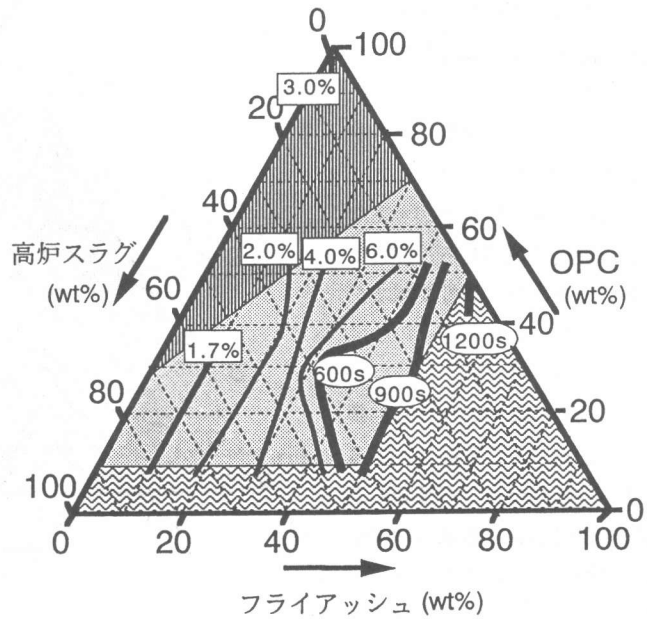


図-7 高性能減水剤の添加量(%P)と練混ぜに要した時間

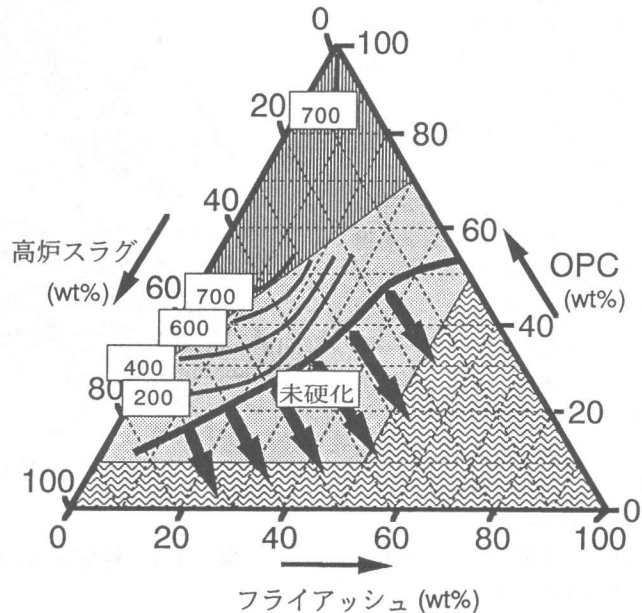


図-8 材令3日圧縮強度(kgf/cm²)

4. まとめ

三成分系セメントの混合比、および高性能減水剤の影響をまとめると、

- 1) 練混ぜ性能はフライアッシュ量の影響が大きい。
- 2) 高性能減水剤の量が一定ならば、強度則がある程度まで予測できるが、高性能減水剤の量を変化させるとその強度則に適応しない。

3) 混合比によっては著しい硬化遅延をおこす可能性がある。

以上のことから、多種類の混和材を使用し高性能減水剤を添加した超流動コンクリートが開発されているが、配合設計法には硬化の遅れや強度発現性状を十分考慮しなければならないと考えられる。

参考文献

- 1) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針(案)、土木学会コンクリート・ライブラリー第63号、pp4-8
- 2) 十河・近松・金沢・古屋：三成分系低発熱セメントを用いた高流動コンクリートの基礎的性質、コンクリート工学年次論文報告集14-1, pp33-38
- 3) 早川・松岡・山田・黒岩：超流動コンクリートの打放し建築構造物への適用、コンクリート工学年次報告論文集14-1, pp91-94
- 4) 濱園・生野・大矢・西山：ハイパフォーマンスコンクリートの実構造物における製造と品質管理、コンクリート工学年次報告論文集14-1, pp39-44
- 5) 石川・鯉淵・村上：高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和材への適用研究(その2)、1991年度日本建築学会大会学術講演梗概集、pp1003-1004

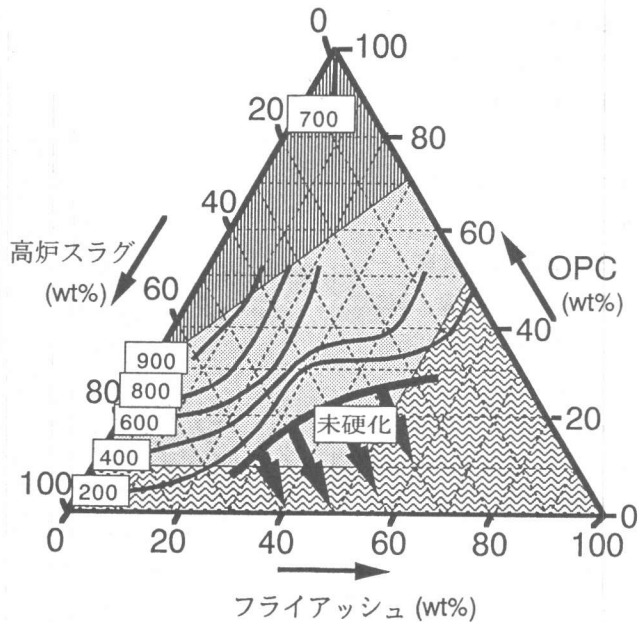


図-9 材令7日圧縮強度(kgf/cm²)

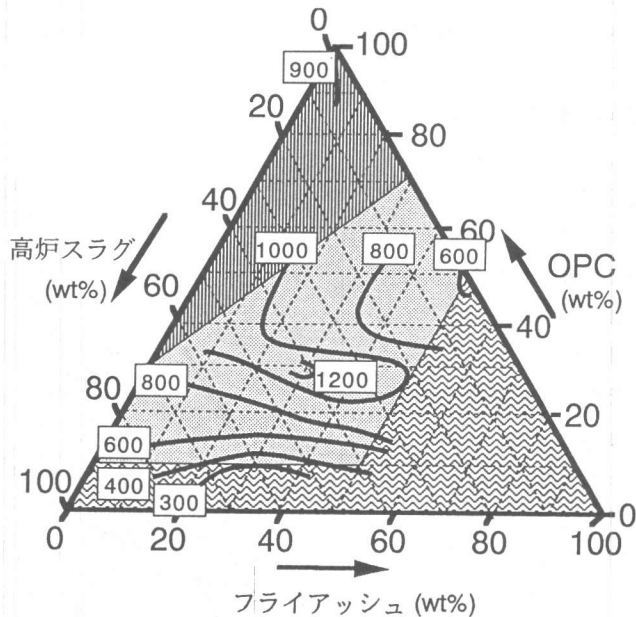


図-10 材令28日圧縮強度(kgf/cm²)