

論文

[1013] 高炉スラグを用いたRCDコンクリートの諸特性に関する研究

正会員○田邊大次郎 (熊本組土木本部)

正会員 阪田 憲次 (岡山大学工学部)

廣村 治 (熊本組技術研究所)

1. はじめに

コンクリートダムの合理化施工方法として開発されたRCD工法は、その施工実績が10件程度あり、現在では完成された工法として定着しつつある。この工法は、敷均しと締固めをそれぞれに適した機械を使用することに特徴があり、このため、使用するコンクリートは単位水量が少ない超硬練りのコンクリートである。混和材料としては、セメントの水和熱の低減、また、少ないセメント量で細骨材の空隙をセメントペーストで満たすために、セメントより比重の小さいフライアッシュが使用されている。しかし、フライアッシュは、良質の石炭の枯渇およびNOx規制による火力発電所のボイラーの燃焼温度の低下により、JIS規格に適合しないものが増大しており、今後のコンクリート用混和材料としての利用範囲が限定される可能性がある。

こうした背景から、本研究はフライアッシュに代わる混和材料として高炉スラグ微粉末を取り上げ、高炉スラグ微粉末がRCDコンクリートのフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの性状に及ぼす影響を実験的に明らかにしようとするものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料およびコンクリート配合

(1) セメントおよび混和材料

セメントは中庸熱ポルトランドセメント (図中の記号:M) および普通ポルトランドセメント (記号:N) を用いた。また、混和材は表-1に示す、同一工場より製造された3種類の粉末度の異なる高炉スラグ微粉末 (記号:A) およびフライアッシュ (記号:F) を使用した。

(2) 骨材

細骨材は川砂 (表乾比重: 2.62、粗粒率: 2.98) を、粗骨材は最大寸法が80mmの碎石 (表乾比重: 2.74、粗粒率: 7.89) を使用した。粗骨材の混合割合は予備実験 (単位容積重量試験) より、単位容積重量が最大となる80~40mm: 40~20mm: 20~5mm=35%: 30%: 35%とした。

表-1 混和材料の化学成分および物理試験結果

混和材の種類	化 学 成 分 (%)					ブレン値 ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )	比重
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO		
高炉スラグ (1)	34.3	13.8	1.8	40.5	7.4	2,550	2.91
高炉スラグ (2)	34.6	14.3	0.3	41.3	6.9	3,270	2.91
高炉スラグ (3)	34.8	14.0	0.6	40.9	7.4	4,090	2.91
フライアッシュ	63.8	21.5	3.6	4.3	0.8	4,100	2.25

(3) コンクリート配合

コンクリートの配合は、RCD工法技術指針 (案) ( (財) 国土開発技術研究センター編 )<sup>1)</sup>

に基づき、配合選定実験を行い、表-2に示すように定めた。ここで、単位結合材量は $120\text{kg}/\text{m}^3$ 、空気量は1.5%とした。

表-2 コンクリート配合

配合名	セメントの種類	混和材の種類	細骨材率(%)	混和材比(%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水	セメント	混和材	細骨材	粗骨材
A-1	普通	高炉スラグ	30	50	100	60	60	664	1,617
A-2	〃	〃	〃	70	95	36	84	668	1,626
A-3	〃	フライアッシュ	〃	30	100	84	36	662	1,611
B-1	中庸熱	高炉スラグ	〃	50	95	60	60	669	1,628
B-2	〃	〃	〃	70	95	36	84	668	1,626
B-3	〃	フライアッシュ	〃	30	95	84	36	666	1,623

## 2. 2 コンクリートの練り混ぜ

コンクリートの練り混ぜは、可傾式ミキサを使用し、空練り1分、本練り3分間とした。

## 2. 3 試験項目および試験方法

### (1) フレッシュコンクリートの試験

フレッシュコンクリートについて実施した試験項目は、①VC試験、②単位容積重量試験である。

VC試験は、小型試験機(振動数:3,000cpm、振幅1.0mm)を用いて、RCD工法技術指針(案)に示されている方法に準じて行った。単位容積重量は、VC試験終了後のコンクリートの容積および重量を測定することにより求めた。

### (2) 硬化コンクリートの試験

硬化コンクリートについて実施した試験項目は、①圧縮強度試験、②断熱温度上昇試験および③擬似断熱温度上昇試験である。各試験には、40mmふるいでウェットスクリーニングしたコンクリートを使用した。

圧縮強度試験は、RCD工法技術指針(案)に示されている方法により供試体を作成し、試験材令は7、28、56、91および182日(材令91、182日については現在養生中)とした。断熱温度上昇試験は、圧縮強度試験と同様に供試体(24×24×24cm)を作成し、水循環式の試験装置を用いて行った。擬似断熱温度上昇については、断熱温度上昇試験と同様な供試体を用いて、断熱材(厚さ20~30cmの発泡スチロール)で被覆した供試体の中心部の温度を測定した。すなわち、ここで言う擬似断熱温度とは完全な断熱状態の温度ではなく、ある程度の外気温の影響を受ける断熱材中のコンクリート温度である。なお、いずれの試験においても温度測定には熱電対(JIS 0.75級、銅コンスタンタン)を用い、測定期間はコンクリート打込み完了直後から材令14日までとした。

## 3. 試験結果および考察

### (1) フレッシュコンクリートの性状

#### ① VC値の特性

図-1は、単位水量が $95\text{kg}/\text{m}^3$ の結合材について、粉末度および置換率とVC値との関係を示したものである。

高炉スラグ微粉末の置換率による影響について見ると、VC値は、いずれの粉末度の場合においても置換率が70%のほうが50%の場合よりも小さい値を示している。このことより、置換率50%の場合よりも置換率が大きい70%のほうが締固まりやすく、締固め性状に優れていることがわかる。これは、高炉スラグ微粉末はセメントよりも比重が小さく、その置換率が大きいほどコンクリート中のモルタル容積、特にセメントペースト容積が増大するためであると考えられる。また、置換率が70%において、セメントの種類による影響について見ると、中庸熟ポルトランドセメントを使用した場合のほうが普通ポルトランドセメントよりもVC値が小さく、締固め性状に優れていることがわかる。

高炉スラグ微粉末の粉末度による影響について見ると、VC値は、セメントの種類に関係なく、粉末度が大きいほど小さい値を示す傾向が認められる。これは、粉末度が大きい、すなわち粒径が小さいほうが細骨材の空隙を満たしやすく、モルタルのコンシステンシーが良好であるためと考えられる。また、フライアッシュを30%置換した場合のVC値は、粉末度がほぼ等しい高炉スラグ微粉末を中庸熟ポルトランドセメントに70%置換した場合とほぼ同じである。

## ② 単位容積重量の特性

図-2は、各結合材の粉末度および置換率と充填率（理論的な単位容積重量と実測された単位容積重量の比）との関係を示したものである。ここで、各結合材の単位容積重量の測定値は、平均が $2,450\text{kg}/\text{m}^3$ であり、各値は平均値からの偏差が $\pm 1\%$ 以内で分布している。

高炉スラグの微粉末の置換率の影響について見ると、充填率は、置換率50%よりも置換率70%の場合が大きい値を示しており、置換率が大きいほうが密実なコンクリートが得られることがわかる。高炉スラグ微粉末の比重はセメントの比重より小さいにもかかわらず、このような傾向が認められるのは、前述したように、置換率が大きくなるとコンクリート中のセメントペースト容積が増大し、締固め性状が改善されるためと思われる。

高炉スラグ微粉末の粉末度による影響について見ると、中庸熟ポルトランドセメントに混入した場合には、粉末度が大きくなるにつれて充填率が高くなる傾向が認められる。しかし、普通ポルトランドセメントの場合には、粉末度と充填率には明確な関係が認められない。混和材の種類による充填率の違いを見ると、フライアッシュの場合は高炉スラグ微粉末よりも充填率が高く、充填性に優れていることがわかる。これは、両者の粒子の形状の違いによるものであると思われる。

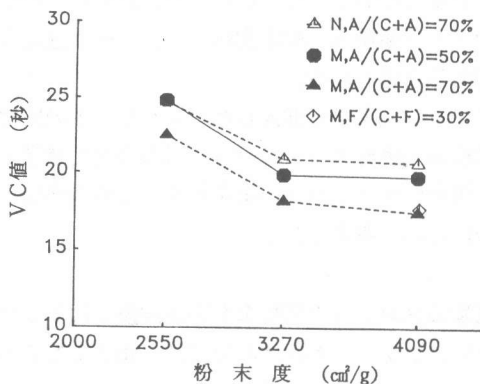


図-1 VC試験結果

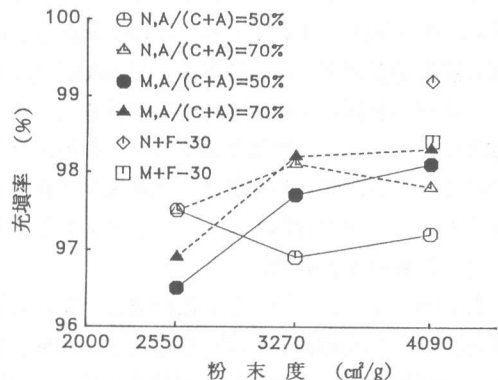


図-2 単位容積重量試験結果

## (2) 硬化コンクリートの性状

### ① 圧縮強度特性

図-3および図-4は、それぞれ中庸熟ポルトランドセメントおよび普通ポルトランドセメントを使用した各結合材の圧縮試験結果を示したものである。各々の図は、フレッシュコンクリートの試験結果と同様に、粉末度および置換率と圧縮強度との関係を表している。

各結合材の単位水量が等しい中庸熟ポルトランドセメントの場合について、高炉スラグ微粉末の置換率による影響について見ると、初期の材令7日においては置換率による圧縮強度の影響は認められないが、材令が経過するにつれて、置換率70%の圧縮強度は置換率50%よりも増大する傾向があることがわかる。この結果は、単位容積重量試験における、置換率が大きいほうが密実なコンクリートが得られるという結果と一致するものである。普通ポルトランドセメントの場合については、単位水量が異なるため、単純に比較することはできないが、置換率70%よりも単位水量が $5\text{kg}/\text{m}^3$ 多い置換率50%と置換率70%の圧縮強度は、いずれの材令においてもほぼ等しい値を示している。

高炉スラグ微粉末の粉末度の影響について見ると、粉末度が $2,550\text{cm}^3/\text{g}$ と $3,270\text{cm}^3/\text{g}$ の圧縮強度は、結合材の種類に関係なくほぼ等しい値を示している。しかし、粉末度が $4,090\text{cm}^3/\text{g}$ の圧縮強度は、他の2つの粉末度の場合よりも大きい値を示しており、この傾向は材令が経過するにつれて顕著に現れている。この結果から、高炉スラグ微粉末の粉末度がコンクリート強度発現に影響を及ぼすのは、粉末度が $4,000\text{cm}^3/\text{g}$ 以上であると思われる。

混和材の種類による影響について見ると、フライアッシュを30%混入したコンクリートの圧縮強度は、セメントの種類に関係なく、高炉スラグ微粉末の場合よりも材令28日以降の強度増進が小さく、材令が56日の強度は、高炉スラグ微粉末の場合に比べて小さい値を示す。この傾向は、使用セメントが中庸熟ポルトランドセメントの場合において顕著である。

### ② 断熱温度上昇特性

普通ポルトランドセメントに粉末度が異なる3種類の高炉スラグ微粉末を70%置換した場合の断熱温度上昇試験結果を図-5に示す。なお、各々のコンクリート打込み温度は、 $10\pm 1^\circ\text{C}$ である。いずれの場合も材令10日で最高温度上昇量 $10^\circ\text{C}$ に達するが、粉末度が大きくなるにつれて初期材令における温度上昇速度は大きくなる傾向が認められる。鈴木ら<sup>2)</sup>の研究によると、コンク

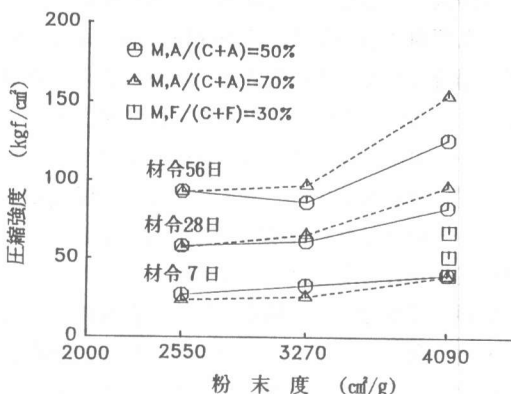


図-3 圧縮強度試験結果  
(中庸熟ポルトランドセメント使用)

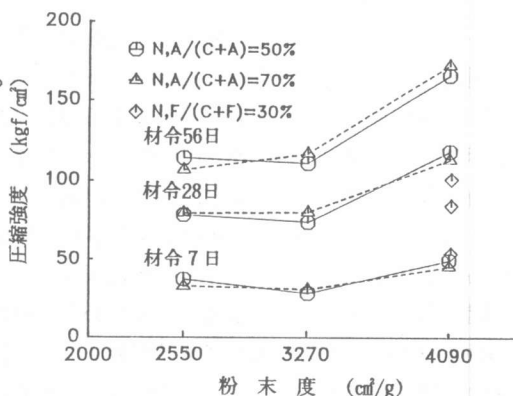


図-4 圧縮強度試験結果  
(普通ポルトランドセメント使用)

リートの打込み温度が20℃の場合には、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を70%置換したときの最高温度上昇量は20℃程度であり、高炉スラグ微粉末を用いた結合材の断熱温度上昇量はコンクリートの打込み温度の影響をかなり受けやすいものであると思われる。

### ③ 擬似断熱温度上昇特性

図-6および図-7は、それぞれ中庸熱ポルトランドセメントおよび普通ポルトランドセメントを使用した各結合材の擬似温度上昇を測定した結果である。この場合、高炉スラグ微粉末の置換率は70%、フライアッシュの置換率は30%である。また、コンクリートの打込み温度は、 $10 \pm 1^\circ\text{C}$ である。

高炉スラグ微粉末の粉末度の影響について見ると、各結合材の初期材令における温度上昇速度はほぼ同程度であり、粉末度が增大するにつれて最高温度上昇量は大きくなる傾向が認められる。粉末度が  $4,090\text{cm}^2/\text{g}$  の最高温度上昇量は  $3.5^\circ\text{C}$ 、その他の粉末度では  $2.0 \sim 2.5^\circ\text{C}$  である。

セメントの種類による影響について見ると、混和材が高炉スラグ微粉末の場合には、初期材令における温度上昇速度に違いが認められ、初期材令における中庸熱ポルトランドセメントの温度上昇速度は、普通ポルトランドセメントの場合より小さく、最高温度に到達する時間も1日程度遅れる。混和材がフライアッシュの場合には、初期材令における温度上昇速度は、両者ともほぼ等しいが、中庸熱ポルトランドセメントの最高温度およびそれ以降の温度は、普通ポルトランドセメントの場合よりも約  $1^\circ\text{C}$  低い値を示す。

混和材の種類による影響について見ると、高炉スラグ微粉末を用いた結合材の温度上昇

はフライアッシュの場合よりも、最高温度が（中庸熱ポルトランドで  $2.0^\circ\text{C}$ 、普通ポルトランドセメントで  $2.5^\circ\text{C}$  程度）低く、また、初期材令における上昇速度も小さいことがわかる。この結果より、コンクリート打込み温度が  $10^\circ\text{C}$  程度では、高炉スラグを70%混入した結合材は、フライアッシュの場合よりも温度上昇に対する低減効果が大きいと考えられるが、断熱温度上昇試験で

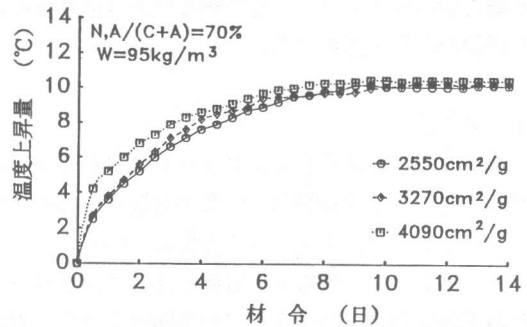


図-5 断熱温度上昇試験結果

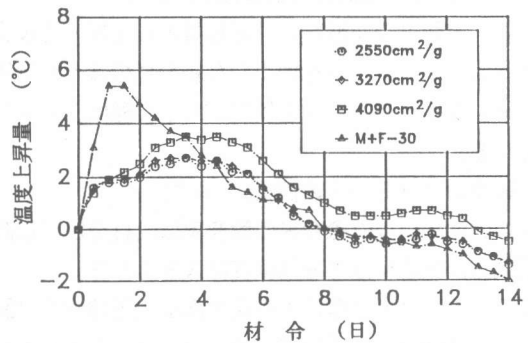


図-6 擬似断熱温度上昇試験結果  
(中庸熱ポルトランドセメント使用)

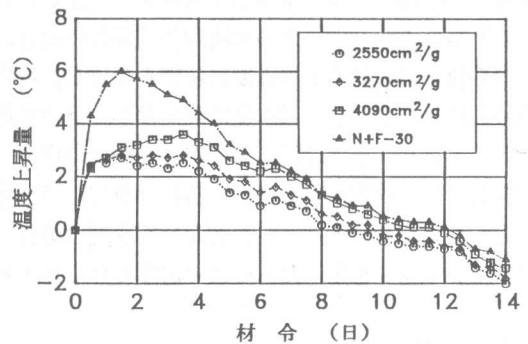


図-7 擬似断熱温度上昇試験結果  
(普通ポルトランドセメント使用)

も述べたように、高炉スラグ微粉末を用いた結合材の温度上昇特性はコンクリート打込み温度の影響を受けやすいため、今後数種類の打込み温度において同様の実験を行い、さらに検討してゆく必要があると思われる。

#### 4. まとめ

本研究では、RCDコンクリートのフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの性状に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響を把握するために行った実験より、以下の結論を得た。

フレッシュコンクリートの性状について、

- (1) 高炉スラグ微粉末の置換率は、コンクリートの締固め性状および充填性に影響を及ぼし、置換率70%の場合のほうが置換率50%よりも、両者の性状は良くなる。
- (2) 高炉スラグ微粉末の粉末度は、コンクリートの締固め性状に影響を及ぼし、粉末度が大きくなるにつれて締固め性状は良くなる。
- (3) 高炉スラグ微粉末を混和材として用いる場合、普通ポルトランドセメントよりも中庸熟ポルトランドセメントを使用した結合材のほうが締固め性状が良い。
- (4) フライアッシュを使用した結合材は、高炉スラグ微粉末を使用したものより充填性に優れている。

硬化コンクリートの性状について、

- (1) 高炉スラグ微粉末の置換率は、材令28日以降のコンクリートの圧縮強度に影響を及ぼし、置換率が大きいほど圧縮強度は大きくなる。
- (2) 高炉スラグ微粉末の粉末度は、圧縮強度に影響を及ぼし、粉末度が  $4,090\text{cm}^2/\text{g}$  の圧縮強度は、 $2,550\text{cm}^2/\text{g}$  および  $3,270\text{cm}^2/\text{g}$  の場合よりも大きい値を示す。また、この傾向は材令が経過するにつれて顕著となる。
- (3) フライアッシュを使用した結合材の圧縮強度は、材令による強度増進が少なく、材令56日においては高炉スラグ微粉末の場合よりも小さい値を示す。
- (4) コンクリート打込み温度が $10^\circ\text{C}$ 程度の場合、高炉スラグ微粉末の粉末度は、断熱温度上昇の初期材令における上昇速度に影響を及ぼし、粉末度が大きいほど上昇速度は大きくなる傾向が認められる。しかし、粉末度は最高温度上昇量に影響しない。
- (5) コンクリート打込み温度が $10^\circ\text{C}$ 程度の場合、高炉スラグ微粉末の粉末度は、温度上昇に影響を及ぼし、粉末度が大きくなるにつれて温度上昇量は増大する傾向が認められる。
- (6) コンクリート打込み温度が $10^\circ\text{C}$ 程度の場合、高炉スラグ微粉末を70%混入した結合材は、フライアッシュを用いたものより温度上昇に対する低減効果が大きい。

#### 【参考文献】

- 1) (財) 国土開発技術研究センター：RCD工法技術指針(案)、1989. 8
- 2) 鈴木徳行、近田孝夫、長尾之彦：高炉水砕スラグ・高炉セメントを使用したRCDコンクリートの基本性状、セメント技術年報、38、昭和59年、pp. 258~261