

論文

[1045] RCD コンクリートの特性に及ぼすフライアッシュ置換率の影響

正会員○馬場道隆 (北海道開発局 開発土木研究所)

正会員 堺 孝司 (北海道開発局 開発土木研究所)

1. まえがき

現在、わが国における重力式コンクリートダムの建設には、超硬練りコンクリートを振動ローラによって締固めるRCD工法が多く採用されている。RCD工法ではレア打設が行われることおよび貧配合超固練りのコンクリートが用いられることから、コンクリートの配合設計においては、発熱および締固めに特別な配慮が必要となる。

コンクリートの発熱を抑制するための一般的な方法は、ベースセメントとして中庸熱ポルトランドセメントを用い、更にセメントの一部を混和材によって置換するものである。混和材としては、フライアッシュや高炉スラグが用いられてきたが、最近では石灰石微粉末に関する検討も行われ始めている[1,2]。これまで、RCD用混和材としては、ほとんどの場合フライアッシュが用いられてきた。著者らが知る限りでは、北海道開発局が現在施工している札内川ダムが、RCDコンクリートの混和材として高炉スラグを用いた唯一の例である[3]。RCDコンクリートにおけるセメントのフライアッシュ置換率は、これまでそのほとんどが20%および30%であった。フライアッシュの置換率が大きくなると、一般にコンクリートの発熱が抑制され、締固め効率がよくなり、初期における強度が小さくなることが考えられる。これまで、RCDコンクリートの締固めや配合に関する基礎的な研究が行われてきた[4,5,6,7,8,9]。しかしながら、フライアッシュが高置換された場合のRCDコンクリートに関する研究は少ない。

本研究の目的は、RCDコンクリートの締固め、発熱、および強度に及ぼすフライアッシュ置換率の影響について検討することである。また、比較のために、高炉スラグセメントを用いた場合およびRCD用混和剤を用いた場合に関する試験も行った。

2. 試験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

セメントは、ベースセメントとして中庸熱ポルトランドセメント(比重3.21、比表面積3,360 cm^2/g)を用いた。混和材は、フライアッシュ(比重2.27、比表面積3,400 cm^2/g)および高炉スラグ(比重2.91、比表面積3,960 cm^2/g)を用いた。セメントの混和材による置換率は、フライアッシュが30%、35%、40%、および45%の4種、高炉スラグが55%の1種とした。混和材混合後のセメントの化学成分および物理試験結果を表-1に示す。混和剤は、主成分がリグニンスルホン酸化合物であるAE減水剤遅延型(以下、AE減水剤と略)および主成分が変性リグニンスルホン酸カルシウムであるRCD用混和剤を用いた。その使用量は、混和剤の標準使用量とし、それぞれセメント重量の0.25%および2%とした。

細骨材は、北海道石狩川水系空知川産の川砂を原料とし、5mm以上のものは破碎を行い、5mm以下に砕いた砂および破碎を行わない砂を製砂用ロットミルにより混合したものを用いた。また粗骨材は、同じく空知川産の河床石を砕石プラントにおいて破碎し、粒径80~40mm、40~20mm、20~5mmの3群に分級したものを用いた。表-2に、使用した骨材の物理試験結果を示す。

表一 1 セメントの化学成分および物理試験結果

セメント	化 学 成 分 (%)							比表面積 (cm ² /g)	比 重
	ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃		
フライアッシュセメント 置換率30%	0.8	17.2	3.7	2.8	45.9	1.4	1.7	3.390	2.87
フライアッシュセメント 置換率35%	0.7	15.6	4.0	2.4	43.0	1.4	1.6	3.320	2.81
フライアッシュセメント 置換率40%	0.7	14.3	4.0	2.3	39.6	1.3	1.5	3.380	2.75
フライアッシュセメント 置換率45%	0.7	13.2	3.9	2.2	36.5	1.3	1.5	3.380	2.70
高炉スラグセメント 置換率55%	0.4	28.8	11.0	1.8	50.1	4.3	2.2	3.910	3.00

表一 2 骨材の物理試験結果

項目 粒径 (mm)	比 重	吸水率 (%)	粗粒率	単位容積重量 (kg/m ³)	洗い損失量 (%)	実績率 (%)	すりへり 減量 (%)	安定性 (%)
80~40	2.69	0.57	9.03	1605	0.45	60.0	16.1	5.0
40~20	2.70	1.31	8.02	1535	0.50	57.6	21.7	7.5
20~ 5	2.71	1.69	6.73	1582	2.34	59.4	19.4	12.3
5以下	2.68	2.29	2.92	1646	5.93	62.8	—	6.3

粗骨材の混合比は、JIS-A-1104 骨材の単位容積重量試験における、ジッキング法により決定した。試験は、表一 3 に示すように5種類の混合比について行った。試験結果から、単位容積重量が最も大きくなる混合比30 : 40 : 30を用いることにした。

表一 3 粗骨材の単位容積重量試験結果

No	混合比 (容積比) %			単位容積重量 (kg/m ³)
	80~40mm	40~20mm	20~5mm	
1	40	30	30	1,752
2	30	40	30	1,755
3	30	30	40	1,750
4	30	35	35	1,753
5	35	35	30	1,751

VC試験に用いたコンクリートの配合は、混和材の置換率ごとに単位水量を一定として細骨材率 (以下、s/a と略) を変えた場合と、s/aを一定として単位水量を変えた場合を設定した。表一 4 に、コンクリートの配合の一覧を示す。すべての配合において、空気量は 1.5±1 % を目標とした。なお、置換率35%のフライアッシュセメント (以下、フライアッシュ35%と略) については、s/a が32%、単位水量が88kg/m³ の1水準とした。RCD用混和剤とAE減水剤の比較は、フライアッシュ30%の場合のみを考慮し、s/aを32%と一定にした。

圧縮強度試験に用いたコンクリートの配合は、表一 4 に示すように、s/aを30、32、34%の3水準とした。また、単位水量は、フライアッシュが83、88、93kg/m³ の3水準、高炉スラグが85、90、95kg/m³ の3水準とした。断熱温度上昇試験に用いたコンクリートの配合は、表一 4 に示す3種とした。単位水量は、フライアッシュが88kg/m³、スラグが90kg/m³ とした。

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、二軸強制練りミキサ (容量200 ℓ) を使用した。練り混ぜ時間は細骨材、粒径20~5mmおよび40~20mmの粗骨材を投入後5秒、セメントを投入後10秒、さらに、粒径80~40mmの粗骨材、水、および混和剤を投入後65秒とした。なお、コンクリートの練り上が

り温度は、何れも20℃を目標とした。

2. 3 試験項目および試験方法

(1) VC試験

VC試験は、VC試験機（振動数3,000cpm、振幅1mm）を使用し、大型容器（φ48×40cm）にて行った。VC試験機の振動により、試料上面に置かれた円板表面のスリットにモルタルが浮かび上がるまでの時間を秒で表し、VC値とする。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験用供試体はRCD工法技術指針（案）[10]に従って作成した。また、試験材令は7、28、91日とした。

(3) 断熱温度上昇試験

断熱温度上昇試験は、空気循環方式の試験機を用いた。供試体は、練り上がったフルサイズのコンクリートをφ40×40cmの型枠内に三層に分けて投入し、タンパにより各層ごとにモルタルが浮上するまで振動を与える方法にて作成した。

3. 試験結果および考察

3. 1 VC値

図-1に、コンクリートのs/aとVC値の関係を示す。なお、単位水量は、フライアッシュセメントの場合が88kg/m³、置換率55%の高炉スラグセメント（以下スラグ55%と略）の場合が90kg/m³である。一般に、s/aを除く同じ配合条件のコンクリートには、VC値が最小となるs/aが存在する。例えば、フライアッシュ30%の場合のVC値は、s/aが32%の時に最小値を示す。また、この場合、VC値が62秒であることから、この配合は、実施工において要求される標準的なコンシステンシーを有するものであるといえる。フライアッシュ置換率の影響に着目すると、s/aが同一である場合、VC値は、置換率が増加すると小さくなる。このことから、フライアッシュには締固め促進効果があり、その効果は置換率が増加するほど大きくなるといえる。また、VC値は、何れの置換率においてもs/aが32%でほぼ最小となっている。このことは、コンクリ

表-4 コンクリートの配合

混和材の種類	混和材置換率 (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					VC試験	圧縮強度試験	断熱温度上昇試験
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤			
フライアッシュ	30	28	88	120	641	1,663	0.3	●		
〃	30	30	88	120	689	1,615	0.3	●	●	
〃	30	32	88	120	734	1,568	0.3	●	●	●
〃	30	34	88	120	780	1,523	0.3	●	●	
〃	30	36	88	120	825	1,477	0.3	●		
〃	30	32	78	120	742	1,588	0.3	●		
〃	30	32	83	120	737	1,580	0.3	●	●	
〃	30	32	93	120	729	1,560	0.3	●	●	
〃	30	32	98	120	724	1,552	0.3	●		
〃	35	32	88	120	732	1,568	0.3	●	●	
〃	40	28	88	120	641	1,657	0.3	●		
〃	40	30	88	120	686	1,612	0.3	●	●	
〃	40	32	88	120	732	1,566	0.3	●	●	
〃	40	34	88	120	777	1,520	0.3	●	●	
〃	40	36	88	120	823	1,475	0.3	●		
〃	40	32	78	120	740	1,585	0.3	●		
〃	40	32	83	120	737	1,574	0.3	●	●	
〃	40	32	93	120	726	1,588	0.3	●	●	
〃	40	32	98	120	739	1,547	0.3	●		
〃	45	28	88	120	641	1,657	0.3	●		
〃	45	30	88	120	686	1,612	0.3	●	●	
〃	45	32	88	120	732	1,566	0.3	●	●	●
〃	45	34	88	120	777	1,520	0.3	●	●	
〃	45	36	88	120	823	1,475	0.3	●		
〃	45	32	78	120	740	1,585	0.3	●		
〃	45	32	83	120	737	1,574	0.3	●	●	
〃	45	32	93	120	726	1,558	0.3	●	●	
〃	45	32	98	120	724	1,547	0.3	●		
スラグ	55	28	90	120	641	1,663	0.3	●		
〃	55	30	90	120	689	1,615	0.3	●	●	
〃	55	32	90	120	734	1,568	0.3	●	●	●
〃	55	34	90	120	780	1,523	0.3	●	●	
〃	55	36	90	120	825	1,477	0.3	●		
〃	55	32	85	120	737	1,580	0.3	●	●	
〃	55	32	95	120	729	1,560	0.3	●	●	
フライアッシュ	30	32	73	120	745	1,598	※2.4	●	●	
〃	30	32	78	120	742	1,588	※2.4	●	●	
〃	30	32	83	120	737	1,580	※2.4	●	●	
〃	30	32	88	120	734	1,568	※2.4	●	●	

※RCD用混和剤

●印が試験に用いた配合

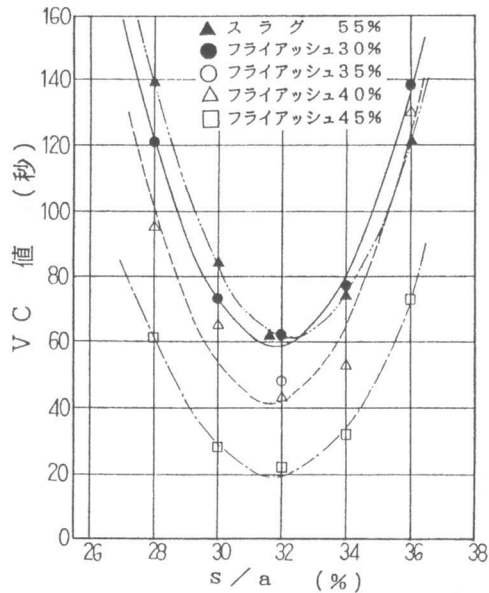


図-1 s/a とVC値の関係

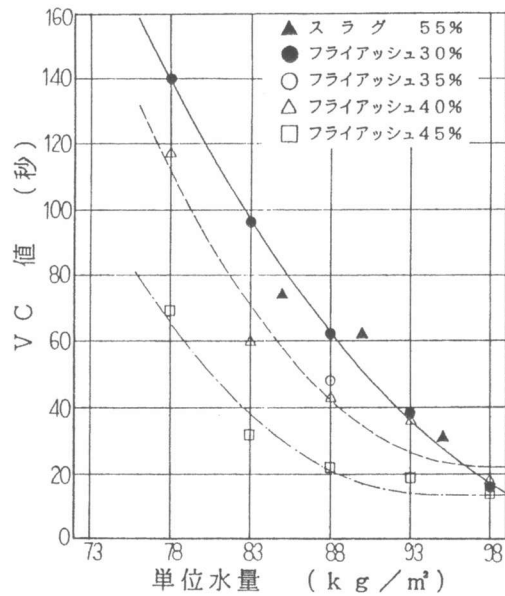


図-2 単位水量とVC値の関係

ートを締固めるための最適な s/a は、フライアッシュ置換率に影響されることなく、ほぼ一定であることを示す。フライアッシュ30%およびスラグ55%の場合を比較すると、 s/a が28%および30%では、フライアッシュ30%のほうがVC値は小さくなるが、 s/a が34%および36%では、スラグ55%のほうが小さい値を示している。しかしながら、両者は、ほぼ同等の締固め特性を有しているといえる。

図-2に、 s/a が32%の場合の単位水量とVC値の関係を示す。一般に、VC値は、単位水量の増加に伴ない小さくなる。また、VC値は、同一単位水量において、置換率が増加するほど小さくなる。しかし、単位水量98kg/m³では、置換率による差はほとんど認められなくなる。これは、単位水量の増加とともに、フライアッシュの効果よりも水による締固め促進効果が大きく寄与することを示すものである。フライアッシュの締固め促進効果を減水量に換算するため、標準VC値60秒を得る単位水量を求めると、フライアッシュ40%では、約85kg/m³、45%では約79kg/m³となる。これらの値をフライアッシュ30%の単位水量と比較すると、フライアッシュ40%で3kg/m³、フライアッシュ45%で9kg/m³減じることが可能であることがわかる。

図-3に、AE減水剤とRCD用混和剤を比較するための単位水量とVC値の関係を示す。VC値は、何れの単位水量においても、RCD用混和剤を用いた場合のほうが小さい値を示しており、RCD用混和剤の締固め促進効果が顕著である。この効果は、標準VC値60秒において単位水量を約7kg/m³減じることに対応する。

3. 2 圧縮強度

図-4に、 s/a と圧縮強度の関係を示す。なお、ここで単位水量は、フライアッシュの場合が88kg/m³、スラグの場合が90kg/m³である。 s/a の影響はあまり顕著ではないが、何れの材令および置換率においても、 s/a が増加すると圧縮強度が低下する傾向がある。また、何れの材令においても置換率が増加すると、圧縮強度は減少する。材令に伴う圧縮強度の増加率は、どの置換率においてもほぼ同じである。スラグ55%とフライアッシュ30%の場合を比較すると、圧縮強度は、どの材令においてもスラグ55%の方が大きな値を示し、材令28日および91日では、その差は顕著である。

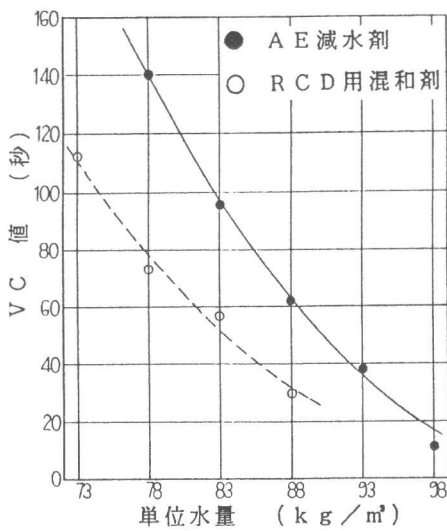


図-3 単位水量とVC値の関係

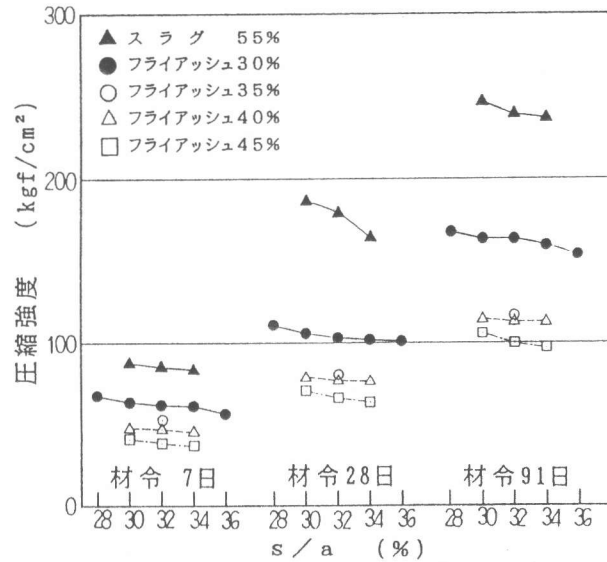


図-4 s/aと圧縮強度の関係

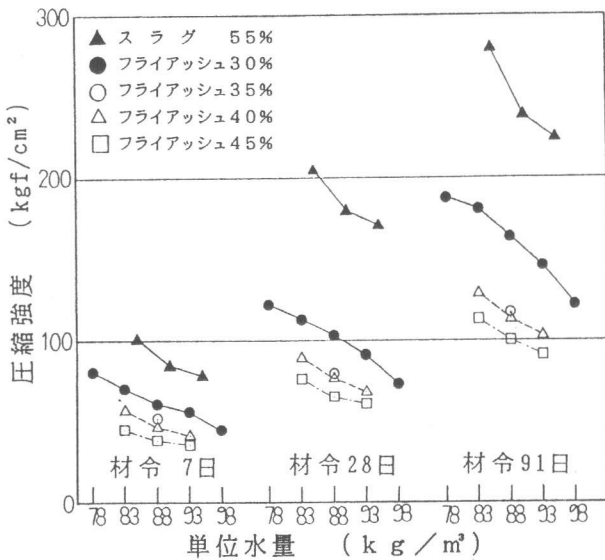


図-5 単位水量と圧縮強度の関係

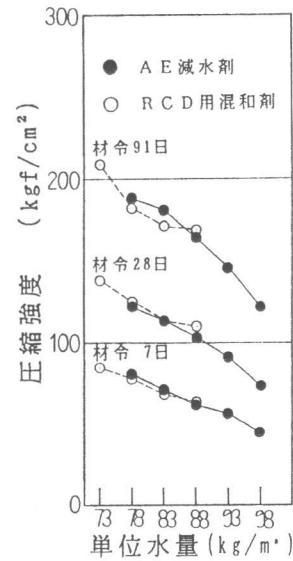


図-6 単位水量と圧縮強度の関係

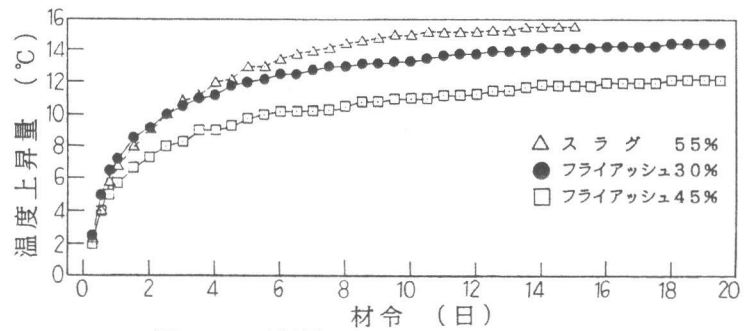
図-5に、s/aが32%の場合の単位水量と圧縮強度の関係を示す。何れの置換率においても、単位水量が増加すると圧縮強度が著しく低下する。また、何れの材令においても、置換率が増加すると圧縮強度は減少する。材令に伴う圧縮強度の増加率は、どの置換率においてもほぼ同じである。スラグ55%とフライアッシュ30%の場合を比較すると、圧縮強度は、どの材令においてもスラグ55%の場合の方が大きな値を示し、材令28日および91日では、その差は顕著である。

図-6に、AE減水剤とRCD用混和剤の効果を比較するための単位水量と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度は、材令91日において若干の差があるものの、同一単位水量においてどちらもほぼ同じ圧縮強度となった。これらの結果から、RCD用混和剤の圧縮強度への影響はほとんどないものと考えられる。

3. 3断熱温度上昇量

図-7に、単位結合材料120kg および s/aが32%の配合における断熱温度上昇試験の結果を示す。フライアッシュ45%の場合の温度上昇量は、フライアッシュ30%の場合よりも約 2.3℃小さ

な結果となった。スラグ55%とフライアッシュ30%の場合の温度上昇量は、材令初期においてはほぼ同じであるが、材令が進むとスラグ55%のほうが約1℃大きな結果となった。



図一七 断熱温度上昇試験結果

4. まとめ

本試験によって得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) フライアッシュ置換率が増加するとVC値は減少する。この影響は、単位水量の増加とともに小さくなり、本試験の場合、単位水量 $98\text{kg}/\text{m}^3$ ではほとんど影響が認められなくなる。
- (2) VC値が最小となる最適 s/aは、フライアッシュ置換率の影響を受けずほぼ一定である。
- (3) RCDコンクリートの締固めにおいて、フライアッシュ置換率の増加によって、単位水量を減ずることが可能である。また、RCD用混和剤の減水効果は、AE減水剤よりも大きい。
- (4) フライアッシュ30%およびスラグ55%の配合は、ほぼ同等の締固め特性を示す。
- (5) フライアッシュ置換率が増加すると、圧縮強度は低下する。
- (6) 材令に伴う圧縮強度の増加率は、何れのフライアッシュ置換率の場合もほぼ同じである。
- (7) スラグ55%の場合の圧縮強度は、フライアッシュ30%の場合よりも大きく、材令28日および91日において、その差は顕著である。
- (8) RCD用混和剤の圧縮強度への影響は、ほとんど認められない。
- (9) フライアッシュ30%の場合の断熱温度上昇量は、45%の場合より約 2.3°C 大きくスラグ55%の場合より約 1°C 小さな結果となった。
- (10) フライアッシュ高置換RCDコンクリートの実際の使用にあたっては、様々な観点からの更なる検討が必要である。

参考文献

- [1]田邊, 他; 「RCDコンクリートの諸特性に及ぼす石灰石微粉末の影響」土木学会第46回年次学術講演会(平成3年9月)、PP.136~137
- [2]岡田, 他; 「石粉を用いたRCDコンクリートに関する研究」土木学会第46回年次学術講演会(平成3年9月)、PP.138~139
- [3]中村, 他; 「高炉セメントを用いたRCD用コンクリートの性質」ダム技術1991増刊No.1、PP.251~276
- [4]渡辺, 他; 「RCDコンクリートの締固めに及ぼすセメントの種類および配合の影響」土木学会第46回年次学術講演会(平成3年9月)、PP.550~551
- [5]田邊, 他; 「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」コンクリート工学年次論文報告集1990、PP.87~92
- [6]松島, 他; 「RCDコンクリートのDM法による品質改善に関する研究」土木学会第46回年次学術講演会(平成3年9月)、PP.542~543
- [7]鈴木, 他; 「微粒分の変化によるコンクリートの特性」土木学会第46回年次学術講演会(平成3年9月)、PP.548~549
- [8]嶋田, 他; 「RCDコンクリートのコンシステンシーに及ぼす影響」土木学会第43回年次学術講演会(昭和63年10月)、PP.20~21
- [9]山口, 他; 「フライアッシュを混入したダムコンクリートの諸特性に関する研究」コンクリート工学年次論文報告集1990、PP.879~884
- [10](財)国土開発技術研究センター編「RCD工法技術指針」(案)、平成元年8月