

RCDコンクリートの配合に関する研究

Study on Design of Mix for RCD Concrete

松井 健一*
Kenichi Matsui

前川 一行*
Kazuyuki Maekawa

高橋 秀樹**
Hideki Takahashi

尾崎 政隆***
Masataka Ozaki

要 約

RCD工法は、ダムの合理化施工法として今後増加することが予想される。しかし、RCDコンクリートは超硬練りで従来のコンクリートとは性状が異なり、配合設計の手法やコンクリートの性状試験の方法にも定まったものがない。本報告は、RCDコンクリートの配合設計の手法についての提案を行い、それを用いた配合例について述べたものである。

目 次

- §1. はじめに
- §2. RCDコンクリートの配合設計の手法
- §3. 各種試験の方法
- §4. 配合設計の例
- §5. おわりに

§1. はじめに

RCD (Roller Compacted Dam) コンクリートは、単位水量、単位セメント量の少ない超硬練り、ダンプトラック等で運搬し、ブルドーザーで撒き出し、振動ローラで締め固めて造るものである。

この方法は、ダムコンクリートの合理化施工法として、機械化施工で経済性を高め工期の短縮をはかる、我国独自のものである。

既に、大川ダムのマツト部および島地川ダム本体の施工においてその効果は認められ、現在までに数基のダムにこの工法が採用されている。当社においても、福島県の真野ダム、山形県の白水川ダムで、現在、RCD工法を用いて施工中である。

RCD工法では、コンクリートを振動ローラによって締

固めるため、従来のダム用コンクリートとは異なり、超硬練りのコンクリートを用いなければならない。また、クーリングを行わなくてもよいように、水和熱による発熱を抑制した単位セメント量の少ないコンクリートにする必要がある。そこで、これらに適合した材料の選択とコンクリートの配合設計を行う必要がある。

しかし、現在のところRCDコンクリートの配合を決める試験として定まったものがない。このため既往の例を参考として、「RCD工法技術指針(案)」⁽¹⁾の方法に準拠し、個々の試験については、それぞれ独自の基準や方法を定める。

RCDコンクリートは超硬練りであり、締め固め方法も他と異なるため、そのコンシステンシーを測るのにスランプ試験を用いることはできない。このコンシステンシーの判定には、振動台式コンシステンシー試験(以下VC試験と称す)によるVC値(Vibrating Compaction Value)を用いることが適当とされ、現在ではVC値をコンクリートの品質を示す代表的な性状として用いている。

その他RCDコンクリートの品質を示す性状としては、締め固め後の密度(単位容積重量)や圧縮強度等も重要であり、配合を定める要素としてこれらの条件も加味する必要がある。

§2. RCDコンクリートの配合設計の手法

*技術研究部技術研究所係長
**技術研究部技術研究所
***中部(支)川越火力(出)工事係長

RCD工法では、コンクリートの締固めが容易となる配合を試験的方法によって選ぶことが大切である。そこで配合試験は、粗骨材の最大寸法、所要強度、コンクリートのコンシステンシーなど配合設計に必要な条件を定めた後、Fig.1に示す手順で行うことにする。

RCDコンクリートの締固めは、一般のコンクリートの締固めと異なり、振動ローラの転圧による骨材粒子の移動と、セメントペーストの細骨材空隙への充填である。

このような考え方をもとに、前述のフローチャートのよう、まずモルタルの単位容積重量試験を行って最も密実なモルタルの得られる水量を求め（単位セメント量

を一定とし水量で調節）、モルタルの空隙を最も少なくする水量は、コンクリートの空隙を最も少なくする単位水量と考えられるため、この値からコンクリートの単位水量の概略値を知ることができる。

次に、単位水量と細骨材率を変化させたコンクリートについて、施工性を示すVC値や、品質を示す単位容積重量・空気量・圧縮強度を求め、総合的に最も適切なコンクリートの配合を決定しようとするものである。

なお、コンクリートの試験では、細骨材率を固定し単位水量を変化させた試験（単位水量決定試験）と、これにより決定した単位水量を一定にし細骨材率を変化させた試験（細骨材率決定試験）とに分かれ、その結果から最終的な配合を定めるものとする。

RCDコンクリートの配合設計では、骨材の空隙とそれを満たす材料の容積との比 α （ペースト・細骨材空隙比）、 β （モルタル・粗骨材空隙比）で検討するとよい⁽²⁾。 α 及び β は、次式により求める。

$$\alpha = \frac{\text{コンクリート } 1\text{m}^3\text{中のペーストの容積}}{\text{コンクリート } 1\text{m}^3\text{中に用いる細骨材の空隙容積}} = \frac{W + (C + F) / \rho_{C+F}}{(1000 / W_{s0} - 1 / \rho_s) \cdot S} \dots\dots\dots (1)$$

$$\beta = \frac{\text{コンクリート } 1\text{m}^3\text{中のモルタルの容積}}{\text{コンクリート } 1\text{m}^3\text{中に用いる粗骨材の空隙容積}} = \frac{W + (C + F) / \rho_{C+F} + S / \rho_s}{(1000 / W_{G0} - 1 / \rho_G) \cdot G} \dots\dots\dots (2)$$

- ここに、 ρ_{C+F} : フライアッシュセメントの比重
- ρ_s : 細骨材の比重
- ρ_G : 粗骨材の比重
- W_{s0} : 細骨材の単位容積重量(kg/m³)
- W_{G0} : 粗骨材の単位容積重量(kg/m³)

α は細骨材の空隙に対するセメントペーストの容積比であり、コンクリートの軟らかさを示すものである。

β は粗骨材の空隙に対するモルタルの容積比であらわし、締固めの作業性を示すものと考えられている。

α や β が1.0ということは、骨材の空隙部分に加不足なく材料が満たされていることを示し、理論的にはこれがより経済的な配合といえる。ただし、骨材の空隙の変動や作業性を考慮すると、 α や β の値は1.0より多少大きくすることが、均一な品質のコンクリートを得るためにも重要であると思われる。

α や β は単位水量や細骨材率に影響を受ける。単位水量と α については、コンクリートの水量を増加させると単位骨材量は減少し α 値は増加する。このことは β に関しても同様である。

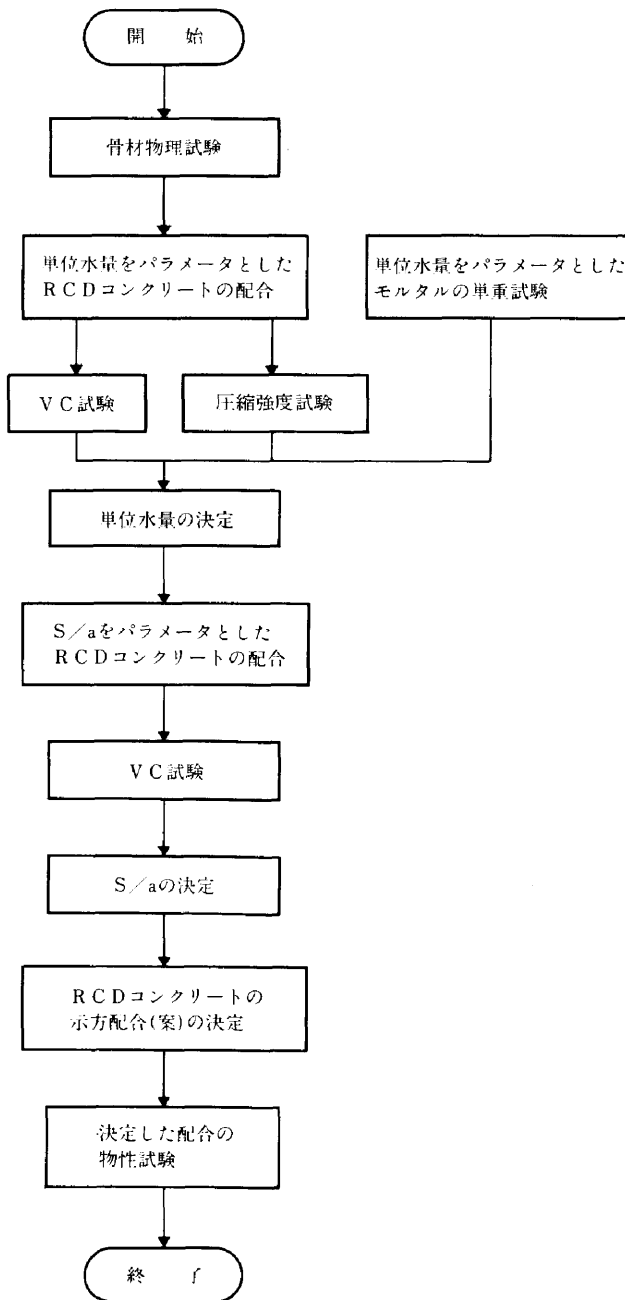


Fig.1 配合設計試験のフロー

一方、細骨材率と α 、 β については、細骨材率を増加させることは単位細骨材量を増加することであり、 α 値は減少し β 値は増加する。

RCDコンクリートの配合設計の目的である単位水量と細骨材率の選定は、適切な α 、 β の値を選定すること、と言い換えることもできる。

§ 3. 各種試験の方法

RCDコンクリートの配合設計を行うためのコンクリートの性状試験は、JISなどで定められた方法を基本として行うが、RCDコンクリートの性状に合わせて、多少の変更や補助的作業の追加が必要となる。特に各試験における試料の詰め方にはこれらの問題が多い。各試験における試料の詰め方にはこれらの問題が多い。

以下、各項目について詳しい試験方法を述べる。

3-1 モルタルの単位容積重量試験方法

(1) 使用機器

モルタルミキサ (ホバート型20ℓ容量)

鋼製円筒容器 (内径14cm, 高さ13cm)

(2) 試験方法

- ① セメントと表乾状態の砂を混合し(1:5~6)、これに所定の水量を加えて練り混ぜたモルタルを試料とする。
- ② 試料を3層に分けて容器に詰め、各層突き棒で25回突き固める。
- ③ 重量を測定し、モルタルの単位容積重量を求める。また、次式によりコンクリートの単位水量を推定し、単位水量とモルタルの単位容積重量との関係を求める。

$$\text{コンクリートの単位水量} = (\text{モルタルの単位水量}) \times (1 - \text{粗骨材の絶対容積}) \dots\dots\dots (3)$$

3-2 大型VC試験方法

(1) 使用機械

電動駆動振動型大型VC試験機 (Photo 1, Fig.2)

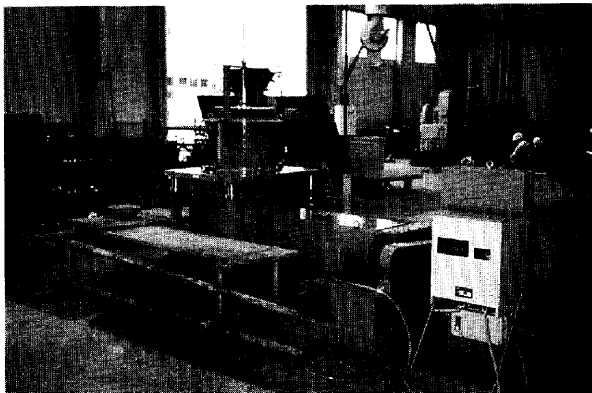


Photo 1 大型VC試験機

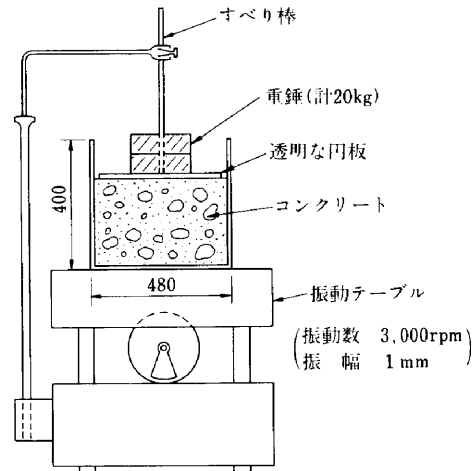


Fig.2 大型VC試験機

(2) 試料

フルサイズのコンクリートを用いる。

(3) 試験方法

- ① 試料を容器 (内径48cm×深さ40cm) 内に3層に分けて詰め、各層50回突き棒で突き固める。
 - ② 上面を水平にならし、10mmフルイを通過したコンクリートを用い表面の凹凸部の修正を行う。
 - ③ 容器を振動台にのせて固定し、アクリル円板を置き20kgのおもりを載せる。
 - ④ 振動台を起振させ(振幅1mm, 振動数3000rpm), 容器の両側から、各々半円部で、アクリル板に切つてあるスリット4個のうち3個までのスリット全域にセメントペーストが浮かび上るまでの時間を測定し、これをVC値(秒)として表示する。
 - ⑤ 試験終了後、コンクリートの容積と重量を測定し、コンクリートの単位容積重量を算出する。
- 試験に用いたVC試験機の仕様を、Table 1に示す。

Table 1 VC試験機仕様

項目	大型VC試験機	小型VC試験機
型式	電動振動型 (無段変速, 二軸駆動)	電動振動型 (一軸駆動)
振動数	400~4,000rpm	3,000rpm
振幅	0~2mm	0~1mm
試験容器	鋼製円筒型 φ480×400mm	鋼製円筒型 φ240×200mm

3-3 小型VC試験方法

(1) 使用機械

電動振動型小型VC試験機 (Photo 2)

(2) 試料

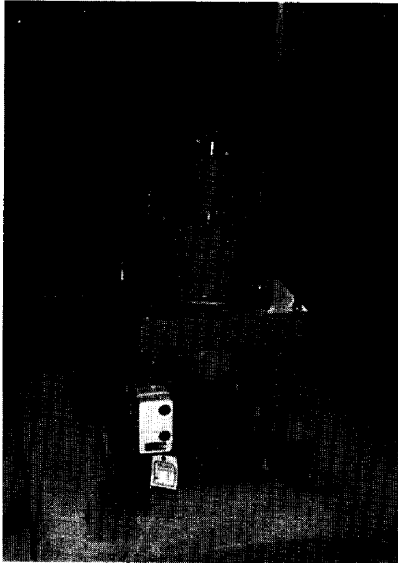


Photo 2 小型VC試験機

40mmフルイでウェットスクリーニングを行ったコンクリートを用いる。

(3) 試験方法

- ① 試料を小型容器（内径24cm×深さ20cm）に2層に分けて詰め、各層突き棒で35回突き固める。
- ② 上面を水平にならし、10mmフルイを通過したコンクリートを用いて表面の凹凸部の修正を行う。
- ③ 容器を振動台にのせて固定し、アクリル円板を置き20kgのおもりを載せる。
- ④ 振動台を運転し、容器の両側から、各々半円部でアクリル板につけた直径20cmの目印の位置まで、完全にセメントペーストが浮かび上がって来るまでの時間を測定し、VC値(秒)として表示する。
- ⑤ 試験終了後、コンクリートの容積と重量を測定し、単位容積重量を算出する。

3-4 空気量試験方法

(1) 使用機械

ワシントン型エアメーター（容量7ℓ）

(2) 試料

40mmフルイでウェットスクリーニングを行ったコンクリートを用いる。

(3) 試験方法

- ① 試料を3層に分けて作成する。
- ② 各層につき、突き棒で25回突き固めた後、小型VC試験機の上に固定し20kgのおもりを載せ、小型VC値に相当する時間の振動を与え試料を締め固める。
- ③ 3層目はコンクリートを余分に盛り、加振後のコンクリート面を容器の上面に合うようにする。
- ④ 容器に試料を詰め振動を与えた後、注水方法によっ

て空気量の測定を行う。

3-5 大型VC試験機を用いた圧縮強度試験用供試体の作成方法

(1) 使用機械

直径15cm、高さ30cmの円柱形型枠

大型VC試験用振動台

(2) 試料

40mmフルイでウェットスクリーニングを行ったコンクリートを用いる。

(3) 試験方法

- ① 試料を3層に分けて作成する。
- ② 各層につき、大きな空隙の残らないように均一となるように突き棒で10回突き固めた後、5kgのおもりを載せ小型VC値に相当する時間だけ振動を与え締め固めを行う。
- ③ 供試体は大型振動台で同時に3～4個作成する。

3-6 振動タンパーを用いた圧縮強度試験用供試体の作成方法

(1) 使用機械

直径15cm、高さ30cmの円柱形型枠

振動タンパー（振動数3000rpm、振幅1mm）

(2) 試料

40mmフルイでウェットスクリーニングを行ったコンクリートを用いる。

(3) 試験方法

- ① 試料を2層に分けて作成する。
- ② 各層につき、大きな空隙の残らないように均一となるよう突き棒で25回突き固めた後、振動タンパー（Photo 3）を用いてセメントペーストがタンパーの周囲に浮かび上がってくるまで振動締め固めを行い、供試体を作成する。

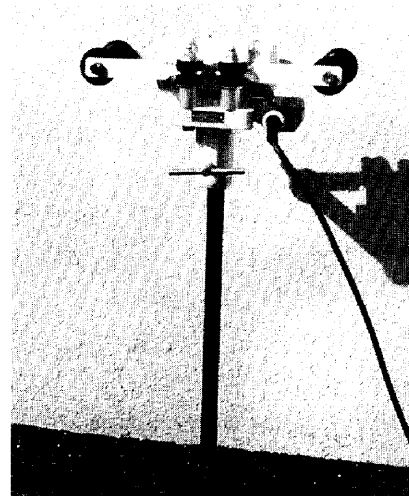


Photo 3 振動タンパー

§ 4. 配合設計の例

以上に示した手法を用いて、RCDコンクリートの配合設計を行ったので以下に述べる。

配合設計は、二種類の骨材を用いて行い、それぞれの配合をA配合、B配合と称する。

4-1 使用した材料

(1) セメント

一般に、ダムコンクリートでは中庸熱セメントが用いられ、更にRCDコンクリートではセメントの水和によるコンクリートの硬化熱を低減するために、セメント量の20~30%程度をフライアッシュに置き換えている。

今回の配合設計においても、既往の工事例に従って中庸熱ポルトランドセメントに、良質のフライアッシュを20%混入した混合セメントを用いた。

(2) 骨材

今回の配合設計では、岩質及び製造方法の異なる二種類の骨材を用いて、骨材の違いがRCDコンクリートの配合に及ぼす影響について検討する。

A配合では、花崗閃緑岩をクラッシャーで湿式破碎し、分級した骨材を用いた。

B配合では、石英安山岩を乾式破碎で製造し、骨材に石粉が付着した状態のものを用いた。

骨材の物理試験結果をTable 2に示す。

粗骨材は三分級されたものを、土木学会ダムコンクリート標準示方書に示される標準粒度範囲、および振動

Table 2 骨材の物理試験結果

骨材の種類	種別	比重	吸水率 (%)	粒度 (FM)	振動台による単位容積重量 (kg/m³)
A	細骨材	2.70	0.88	2.66	1,860
	粗骨材	2.73	0.43	8.19	1,743
B	細骨材	2.58	2.13	2.66	1,720
	粗骨材	2.63	1.90	7.94	1,677

台による単位容積重量が最大となるような混合比を求め使用した。

試験の結果、A配合における粗骨材の混合比は、(G_{80~40}) : (G_{40~20}) : (G_{20~5}) = 35 : 30 : 35, B配合では40 : 30 : 30とした。

4-2 モルタルの単位容積重量試験

モルタルの単位容積重量試験は、セメントと砂の比を1 : 6とし、単位水量を150~350kg/m³に変化させたモルタルで行った。

試験結果をFig.3に示す。

A配合、B配合ともモルタルの単位水量が230~235 kg/m³で最大密度が得られ、これをコンクリートの単位水量に換算すると約100kg/m³程度になる。

A配合のモルタルの最大密度は2,240kg/m³、B配合では2,110kg/m³と両者に差がみられたが、これは砂の比重および実積率の差によるものと思われる。

また、モルタルの単位容積重量試験の締固めの方法には棒突き法と振動締固め法があり、両者の試験法とも最大密度の値にはほとんど差はみられなかったが、振動締

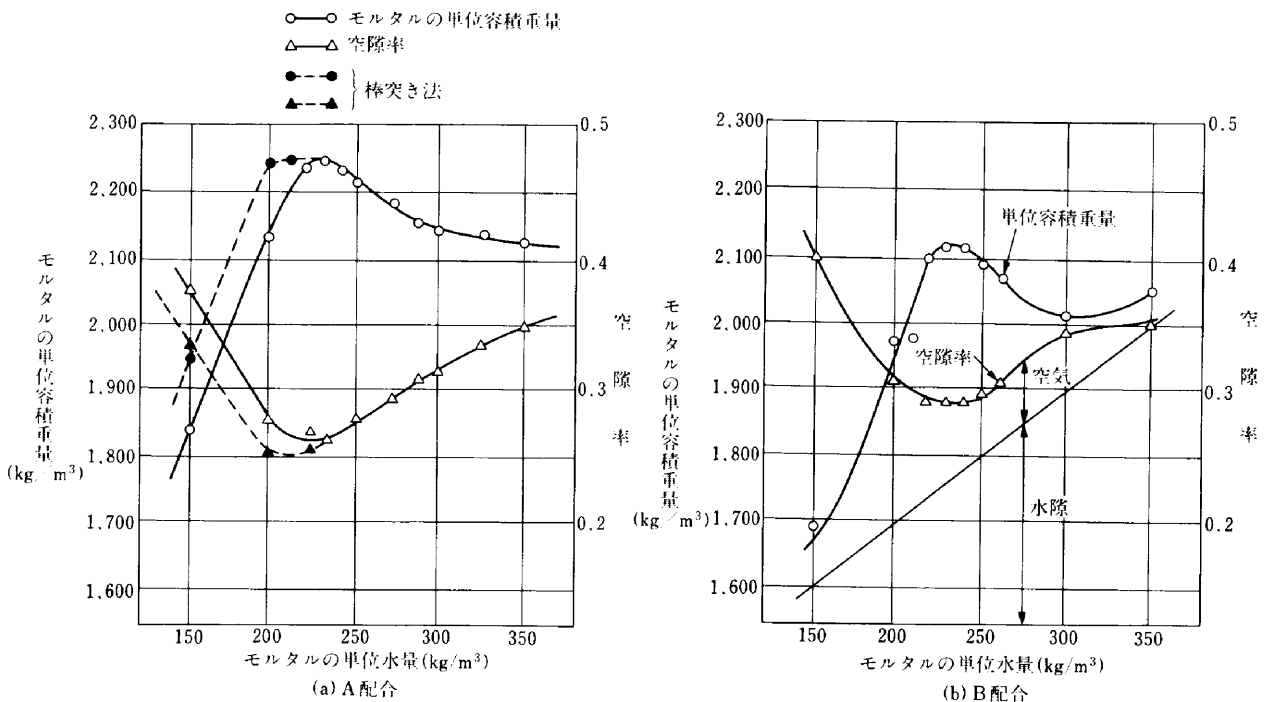


Fig.3 モルタルの単位容積重量試験結果

固め法では最大密度を得る単位水量が約 $200\text{kg}/\text{m}^3$ で、棒突き法と比べて約 $30\text{kg}/\text{m}^3$ 少なかった。

4-3 単位水量をパラメータとしたVC試験

RCDコンクリートの単位水量の目安を求めるために、細骨材率を一定として水量を変えたコンクリートについてVC試験を行った。

単位水量とVC値の関係についてFig.4に示す。

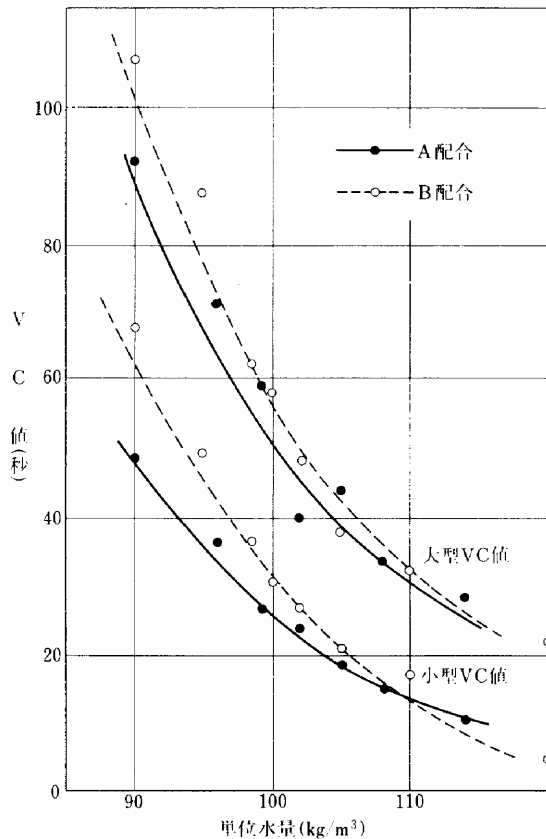


Fig.4 VC試験(大型・小型)結果

VC値と実際のコンクリートを振動ローラで転圧するのに要するエネルギーには相関性がみられ、施工に適したコンクリートのVC値は、骨材の品質・振動ローラの性能・気象条件等によって異なるが、島地川ダムや大川ダム等における施工実績から、大型容器で試験した場合で 60 ± 20 秒程度、小型容器で試験した場合で 20 ± 10 秒程度といわれている。

今回の試験では、小型VC値が $15\sim 20$ 秒程度を得るための単位水量は、A配合で $103\sim 106\text{kg}/\text{m}^3$ 、B配合で $100\sim 103\text{kg}/\text{m}^3$ 程度であり、大型VC値は $40\sim 45$ 秒であった。

次に単位水量と単位容積重量の関係をFig.5に示す。

大型容器によるコンクリートの単位容積重量が小型のものより $50\sim 80\text{kg}/\text{m}^3$ 大きかったが、これは試料として用いたコンクリートの骨材寸法の差や締固めの差による

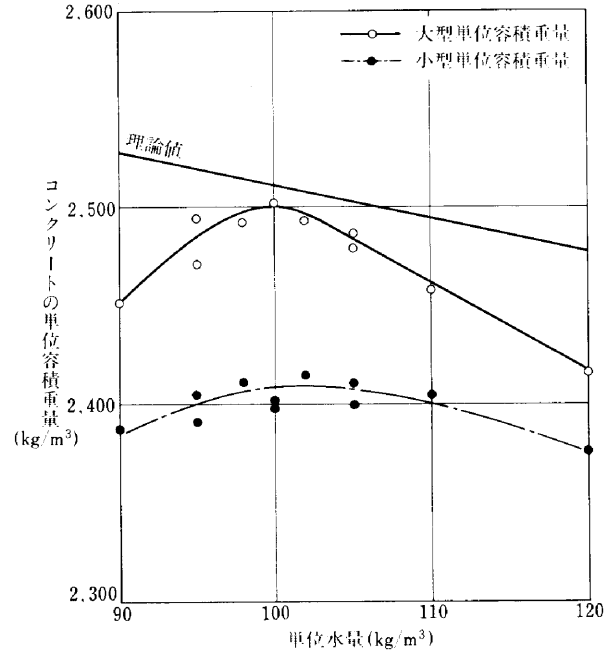


Fig.5 単位水量と単位容積重量(A配合)

ものと思われる。

4-4 細骨材をパラメータとしたVC試験

単位水量を一定にし細骨材率を変化させたコンクリートについてVC試験を行い、VC値が最小となる細骨材率を求めた。

試験の結果をFig.6に示す。

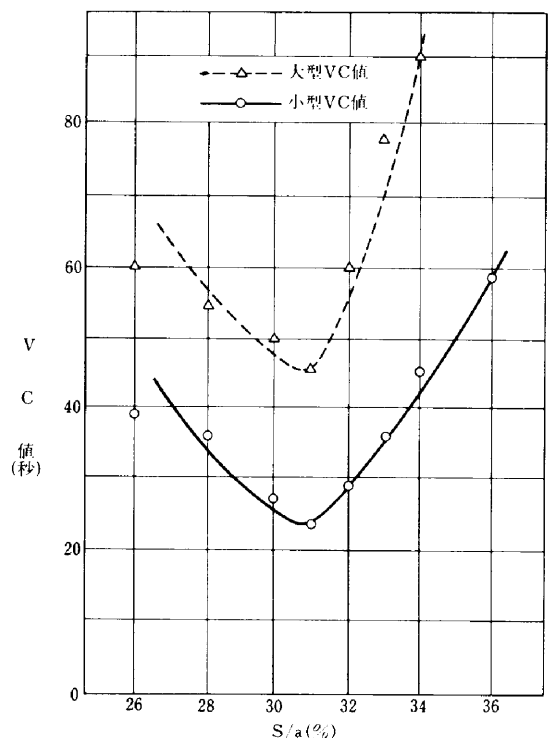


Fig.6 S/aとVC値との関係(B配合)

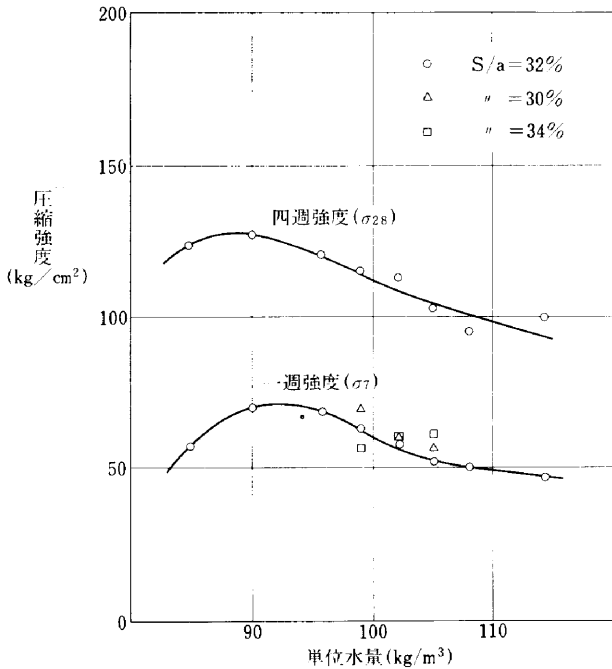


Fig.7 単位水量と圧縮強度 (B配合)

4-5 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果をFig.7に示す。

単位水量が90kg/m³以上では、水量の増大に伴って圧縮強度も低下したが、水量がそれ以下でもコンクリートの締固め性状が悪くなり、供試体内部に空隙ができ圧縮強度は低くなった。

コンクリートの細骨材率の違いは、VC値に影響を及ぼすが圧縮強度には余り影響がみられなかった。

供試体を3-5に示す「大型VC振動台による方法」と、3-6に示す「振動タンパーによる方法」によって作成した場合の強度の比較をFig.8に示す。これによると、振動タンパーで作成した供試体強度には作成者によるばらつきがみられたが、両者の強度差は余りないようであった。このため、実際の施工時における品質管理のための供試体の作成は、比較的簡便な「振動タンパーによる方法」が利用できる。

4-6 配合の決定

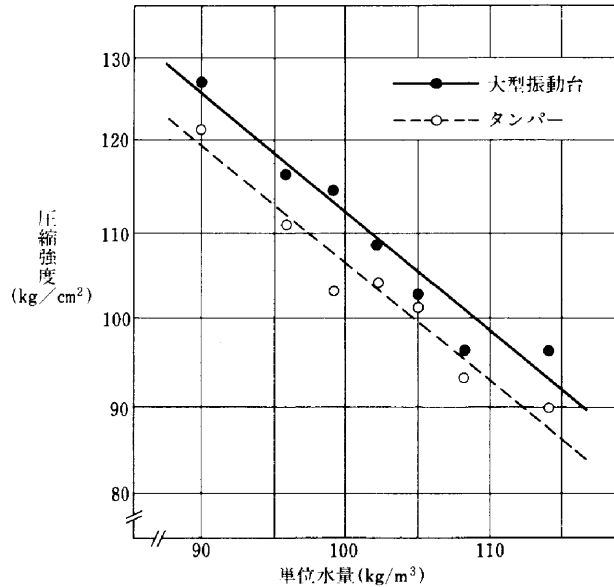


Fig.8 作成方法の違いによる圧縮強度差 (B配合)

以上の試験結果に基づいてRCDコンクリートの配合の決定を行ったが、コンクリートの単位水量は所要の性質を得るために必要な最小の水量とし、細骨材率は材料分離に対する安全性や施工性などを考慮して1~2%多くした。

今回の配合試験で決めたRCDコンクリートの配合をTable 3に示す。

4-7 検討

今回の試験で決定した2例の配合を、既往のダムの実績と比べるとTable 4のようになる。

B配合が、他のダムの配合と比較し細骨材率・単位水量ともやや小さいようであるが、これは骨材に付着していた石粉が、コンクリートのコンシステンシーを改善した効果か、使用した細骨材の実績率がやや小さかったためと思われる。

Fig.9に示すように、大型VC値と小型VC値には相関性が見受けられ、現場におけるコンクリートのコンシステンシーの管理には小型VC試験が十分利用できる。

フルサイズコンクリート (80mm) とウェットスクリー

Table 3 最適配合

配合の種類	粗骨材最大寸法 (mm)	V C 値 (秒)	空 気 量 (%)	水セメント比 (%)	混入率 (%) FC+F	細骨材率 (%) S/a	単 位 量 (kg/m³)						
							水 (W)	セメント (C+F)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)			混和剤 (Ad)
										80mm 40	40mm 20	20mm 5	
A 配合	80	15~20	1.5±1	85.8	20	33	103	120	749	537	460	537	0.30
B 配合	80	15~20	1.5±1	83.3	20	31	100	120	675	612	459	459	0.30

Table 4 他ダムとの配合比較 (Gmax=80mm)

ダム名	S/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	モルタルによる推定単位水量 (kg/m ³)	α	β
島地川	34	105	99.2	1.18	1.30
大川	32	102	98.2	1.23	1.52
A配合	33	103	100.3	1.16	1.33
B配合	31	100	98.3	1.08	1.22

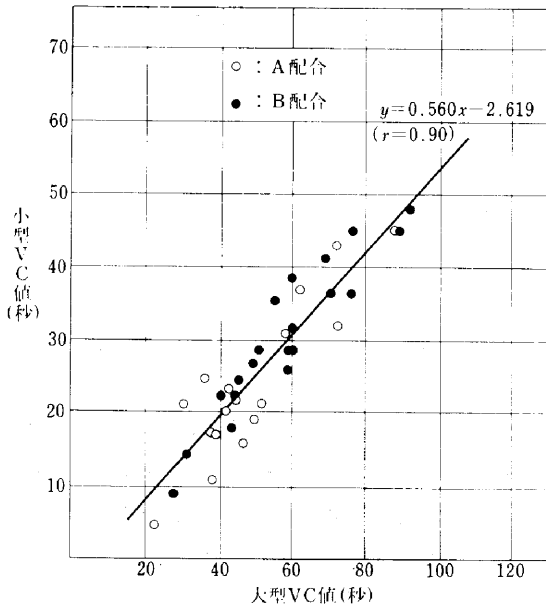


Fig.9 大型VC値と小型VC値との関係

ニングしたコンクリート (40mm) の、単位容積重量の比較をFig.10に示す。スクリーニングコンクリートはフルサイズのものと比較して、単位モルタル量が増加し細骨材率も大きくなっているため、単位容積重量は小さくなっている。

現場での品質管理の手段として、スクリーニングコンクリートを用いての小型VC試験での単位容積重量には問題はないが、配合設計や配合修正試験で単位容積重量の最大となる単位水量や細骨材率を求める場合には、これらのことを考慮する必要があると思われる。

§5. おわりに

我が国におけるRCD工法によるダム施工については、すでに試行的な施工段階が終了し、本格的施工に移行しつつある。

今回のRCDコンクリートの配合設計の手順は、「RCD工法技術指針(案)」に準拠したが、この試験は大型の機械と多くの配合のコンクリートを用いるので、相当の時間と労力を要する。

そこでコンクリートの配合設計の手法ももっと簡素化

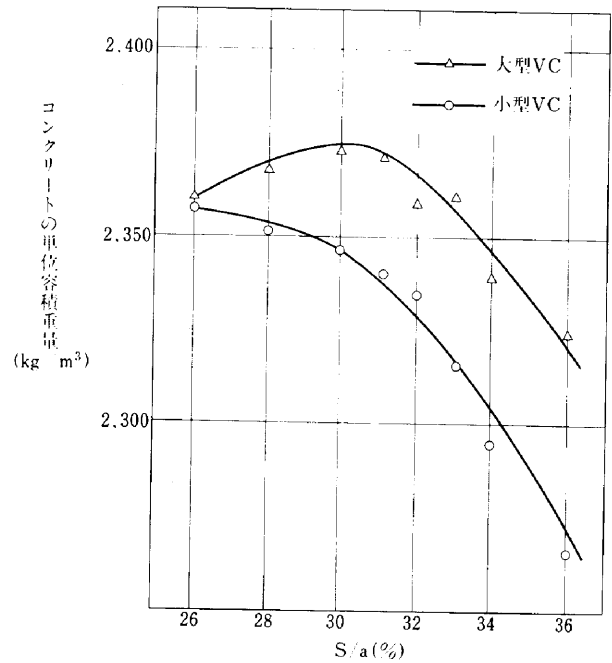


Fig.10 S/aとコンクリートの単重との関係(B配合)

したものが必要となる。

例えば、使用する骨材とモルタルの単位容積重量試験を行えば、コンクリートの単位水量および単位容積重量の日安がつくと思われる。次に既往の施工例を参考にして、適当な α , β 値を決めればコンクリートの配合も決まる。この配合を基本配合として試験練りを行い、コンシステンシーおよび締固めの程度、圧縮強度の確認を行い、不適当であれば配合修正を行う。このような手法で配合設計を行えば、非常に簡便になると思われる。

しかし、室内配合試験では、ミキサも実際の工事で用いるものと比較して小容量のものをを用いざるを得ず、練り混ぜ性能の相違がコンクリートの性状に与える影響も予想される。また、室内試験におけるコンクリートの振動締固めと、工事における振動ローラによる転圧締固め度との間にも差があると思われる。

最終的な示方配合は、これらのことを考慮して、現地での試験施工の状況などを加味し、さらに施工の季節に応じたものを選定することが望ましい。

なお、本実験を進めるにあたり、御助言・御協力を頂いた(株)アイ・エヌ・エー新土木研究所の柳沢得寿氏をはじめ関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 財国土開発技術研究センター編集「RCD工法技術指針(案)」山海堂
- 2) 財国土開発技術研究センター編集「RCD工法によるダム施工」昭和56年7月 山海堂