

粗骨材の最大寸法 150 mm を用いた RCD コンクリートの施工方法の開発研究

奥村忠彦	林 亮 (土木技術部)
栗田守朗	矢花吉治 (技術開発室)
沢出 稔	梶岡保夫 (機材部)
	嶋田 洋 (北海道支店)

§ 1. まえがき

RCD (Roller Compacted Dam) コンクリートは、単位セメント量が 120 kg/m^3 程度と少ない超硬練りのコンクリートをダンプトラック等で運搬し、ブルドーザで撒き出し、振動ローラで締固めて造るコンクリートのことである。コンクリートの原形はイタリアの Alpe Gera ダム¹⁾の施工、アメリカの Lost Creek ダム²⁾における試験施工にある。

RCD 工法は1974年勸国土開発技術研究センターに設けられた「コンクリートダム合理化施工委員会」を中心に研究開発が進められてきたものである。この工法は、

- 1) 水密性、耐久性に対する信頼度が高い、
- 2) 構造解析の精度が高く十分な安全度が確保できる、
- 3) 建設中および完成後における洪水の越流に対する安全性が極めて高い、

のようなコンクリートダムの長所を活かし、さらにフィルダムの施工上の長所を取り入れた施工法であり、コンクリートダムの施工法の合理化の焦点をコンクリートの練りまぜから運搬、打設、養生に至る施工法のうち、主として運搬システムに置いたものである。すなわち、コンクリートの運搬には従来のケーブルクレーンを使用しないでダンプトラックを用い、コンクリートの締固めは人力によらず、振動ローラを使用することなど汎用機械を用いて連続的に省力化して施工を行うことをめざしたものである。RCD 工法はコンクリートの打設速度が速く、工期が短縮され、従来のような大規模な運搬設備を必要としないことなどの優れた経済性を有している。

わが国では大川ダムのマッポ部³⁾、島地川ダム本体⁴⁾に RCD 工法が採用されており、その施工を通じて粗骨材の最大寸法 ($G_{\max}$) 80 mm のコンクリートを層厚 70 cm で施工する方法までの体系が作られた。さらに、新中野ダム減勢工部では $G_{\max}$ を 150 mm と大きくし、層厚を 1 m とした RCD コンクリートを施工して、RCD コンクリートの適用範囲を拡大する研究も行なった。これら

の研究成果を施工指針としてまとめて「RCD 工法技術指針(案)⁵⁾」が発行されるまでに至っている。

海外の動向としては、1981年6月にロンドンで開催された「RCD コンクリート国際会議⁶⁾」で各国から報告があった。しかしながら、ダム本体に RCD コンクリートを採用し、工法を体系化しているのはわが国のみであるといえる。

本報は、新中野ダム減勢工部を RCD コンクリートで施工する資料を得るために行なった施工実験のなかで、 $G_{\max}=150 \text{ mm}$ の RCD コンクリートの施工実験結果を中心としてまとめたものである。

§ 2. 国内外の施工例

わが国における RCD コンクリートの既往の施工例は大川ダム、島地川ダムおよび新中野ダム⁷⁾の3例であるが、他のダムにも適用される計画がある。諸外国の施工例は、いずれも部分的に RCD コンクリートが使用されているのみである。わが国および諸外国の施工例を表一に示す。

RCD 工法とは異なるが、類似した施工例としてイタリアの Alpe Gera Dam¹⁾ (堤高 175m, コンクリート容積 171.6 万 m^3) がある。これはコンクリートをインクラインを通しダンプトラックに積み換えて運搬し、ブルドーザで敷ならしパイブドーザで締固める施工法であり、同様な方法で Quaira della Miniera Dam¹⁾ も施工された。ソ連では Krasnoyarsk Dam¹⁾ (堤高 119m, コンクリート容積 380 万 m^3) においてコンクリートの練りまぜ、運搬、打設を連続して行なうコンクリート施工システムを採用している。コンクリートはベルトコンベアで運搬され、パイブドーザで締固められた。

諸外国では、ダムを建設する河川の幅が広いので、レーヤ工法でコンクリートを打設するのに適しているが、1層の厚さは 30 cm 程度である。わが国では、V字型の

ダム名称	概 要	$G_{\max}$ (mm)	単位セメント量 (kg/m ³)	厚 (cm)
大川ダム ³⁾ (日本)	マット部の基礎岩盤置換えのために使用された。 $F/C+F=20\%$, 約40万m ³	80	120	50
島地川ダム ⁴⁾ (日本)	ダム本体の内部コンクリートに約65,000m ³ を打設。 $F/C+F=30\%$	80	120 130	50 70
新中野ダム ⁷⁾ (日本)	ダム減勢工基礎部に13,000m ³ を打設。 $F/C+F=30\%$	80 150	120	70 100
Tem Ford Dam ²⁾ (USA)	余水吐のコンクリートを施工した。	76	60~80	50
Lost Creek Dam ⁸⁾ (USA)	セメント量を各種変えてダムサイトを施工した。	—	100 140	20
Tarbela Dam ^{8),9)} (パキスタン)	放流管工事の岩盤置換えで約34.4万m ³ の Rollcrete を施工した。	152	142	30
Revelstoke Coffe Dam ⁶⁾ (カナダ)	上流仮締切りダムの堤頂部に耐浸食層として約8,000m ³ を打設した。	38	125 150	—
Milton Brook Dam ⁶⁾ (イギリス)	ダム本体を、水平方向スリップフォームを型わくとして使用して施工。フライラッシュ 142 kg/m ³ 使用。経済的理由から施工が延期されている。	40	85	30
Itaipu Dam ⁶⁾ (パラグアイ)	分水路の基礎に約26,000m ³ を打設した。	19 38 76	91	25

表—1 RCD コンクリートの施工例

谷にダムを建設するので、大量に急速に施工するために1層の厚さを50 cm 以上と厚くしている点に特徴がある。

また、単位セメント量は120kg/m³ 程度が多いが、イギリスではフライアッシュの混入量を70%程度にした施工例もある。わが国でも省資源の観点から、産業副産物であるフライアッシュを多く使う研究も必要と思われる。

§ 3. 研究開発の概要

3.1 開発目標

RCD 工法を新中野ダム減勢工基礎部に採用するにあたり設計条件である材令91日の圧縮強度 $\sigma_{91}=30\text{kg/cm}^2$, 単位容積重量 $w=2.0\text{t/m}^3$ を満たした RCD コンクリートを施工する方法および管理方法を確立しておく必要があった。

しかし、本開発においてはさらに要求品質を高めて高さ80m 程度のダムに適用できるように、 $\sigma_{91}=80\text{kg/cm}^2$, $w=2.3\text{t/m}^3$ を満たす RCD コンクリートの施工方法を確立することを目標とした。

3.2 開発項目

RCD コンクリートの施工方法を開発するにあたり、RCD コンクリートの品質に影響を与える要因を連関図に示した(図—1)。この図から、必要とされる品質を得るためには、まずコンクリートのコンシステンシーを

適切に管理することが重要であり、そのために配合設計水分管理、施工方法、とくに締固め方法について検討する必要があることが分かる。以上のことから、本実験では以下の項目について検討することとした。

(1)配合設計

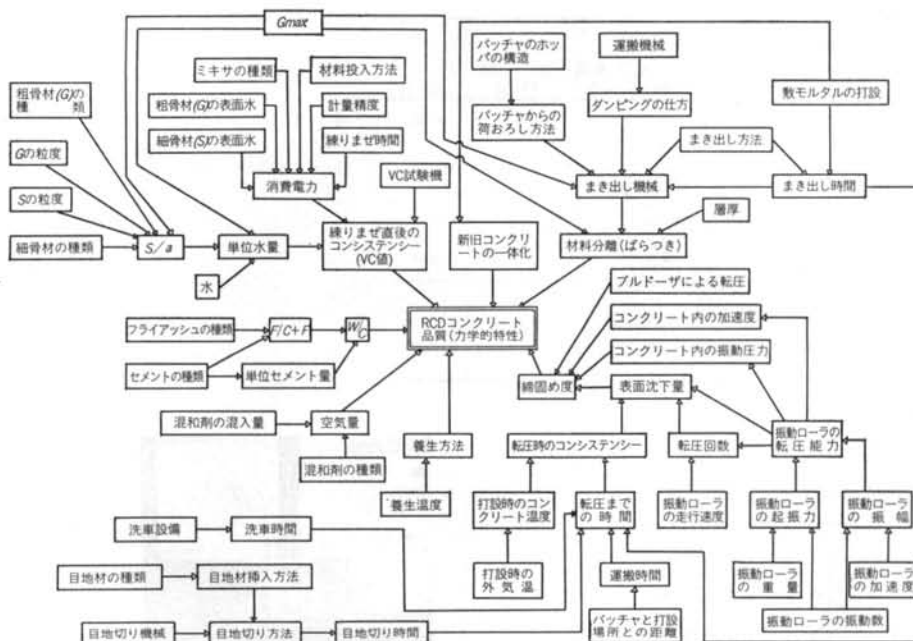
粗骨材の最大寸法 ($G_{\max}$)80mm の配合は、大川ダム³⁾ 島地川ダム⁴⁾ において既に得られているが、省資源の観点から $G_{\max}$ を150mm と大きくした場合について検討することとした。 $G_{\max}$ を大きくすると、運搬中および撤き出し中に粗骨材が分離するとともに、振動ローラによる十分な締固めが行なわれない恐れがある。以上の問題点に対処するように、 $G_{\max}=150\text{mm}$ を用いた場合の配合設計を慎重に行なう。

(2)水分管理

RCD コンクリートは単位水量が少ないため、その管理が困難である。そのため、コンクリートミキサの負荷電力によって RCD コンクリートのコンシステンシーを管理する水分管理装置を開発し、パッチャプラントに設置してその性能確認実験を行なうとともに、静電容量型水分計で管理した場合と比較する。

(3)締固め性状

振動締固め中のコンクリート内の加速度、振動圧力、表面沈下量等を測定し、コンクリートの品質との関係および締固め物性について検討する。また、RCD コンクリートの打設1層内の上部と下部に強度差がみられることおよび締固め直後に生じる表面部のひびわれがコンク



図一1 RCD コンクリートの品質に影響を与える要因の連関図
 リートの品質に悪影響を与えることが問題として指摘されている。そこで、この両者について検討を行なう。

(4) 施工方法

G_{max} 、振動ローラ、撒き出し厚さ等を変えた場合について設計条件を満足する品質が得られる施工方法を確立し、さらに新規に開発した目地切り機の性能確認実験を行なう。目地切り機については、油圧ブレーカを改良した目地切り機を開発し、コンクリートの撒き出し後振動転圧を行なう前に目地を切ることによって大粒径粗骨材が割れることを防止した。また、目地材を目地切りプレートと同時に挿入する方法が施工性が良いことが確認された。

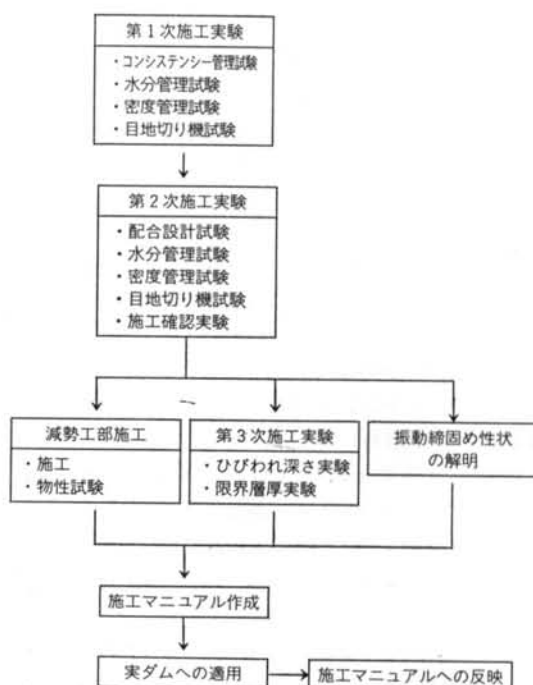
3.3 開発の流れ

開発の流れを図一2に示す。

§ 4. $G_{max}=150mm$ の RCD コンクリートの配合設計

4.1 使用材料

新中野ダム本体のコンクリートと同一の材料を用いた。セメントは、日本セメント㈱上磯工場の中熟フライアッシュセメント ($F/C+D=30\%$) を用いた。セメントの試験成績を表一2に示す。細骨材および粗骨材はそ



図一2 開発の流れ図

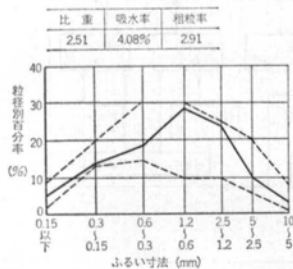
れぞれ砕砂、砕石であり、粒度分布は表一3に示すように「ダムコンクリート標準示方書」の標準範囲を満足するものを用いた。混和剤は、日曹マスタービルダーズ㈱製の遅延型減水剤ポゾリス No. 8 を用いた。

種 類	比 重	比表面積 (cm ² /g)	凝			結			酸化マグ ネシウム (%)	三酸化 硫 黄 (%)	強 減 (%)	熱 量 7 日 (cal/g)	
			室 温 (℃)	湿 度 (%)	水量 (%)	始 発 (時・分)	終 結 (時・分)	安定性					
Lot No. 5		2.84	3,300	20.2	95	25.9	4-30	5-35	優	1.5	1.5	0.6	52.9
JIS R 5213 (1977)	C種	—	2,500以上	20±3	80以上	—	1-00以後	10-00以内	良	5.0以下	3.0以下	—	—

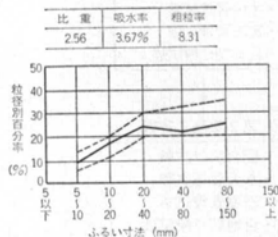
種 類	フロー値	曲げ強さ (kg/cm ²)			圧縮強さ (kg/cm ²)			
		3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日	
Lot No. 5		227	25	32	—	75	120	—
JIS R 5213 (1977)	C種	—	—	—	—	50以上	100以上	210以上

表—2 セメントの試験成績

(1) 細骨材の試験成績



(2) 粗骨材の試験成績



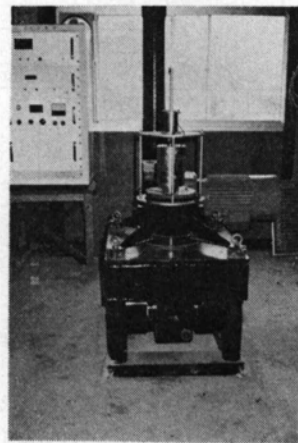
注) 縦軸は「ダムコンクリート標準配合表」に示されている標準範囲

表—3 骨材の試験成績

4.2 コンシステンシー試験方法

4.2.1 VC 試験機

RCD コンクリートはノースランプのコンクリートのため、そのコンシステンシー試験には一般のスランプ試験が適用できない。このような硬練りコンクリートの試験方法としてはVB試験、締固め係数試験、ドロップテーブル試験などがある。舗装用コンクリートのコンシステンシー試験はVB試験を基本とした振動台式コンシステンシー試験方法を用いており、大川ダム、島地川ダムではこの試験方法を参考にしてRCDコンクリート用コンシステンシー試験装置VC試験機を作成している。著者等は島地川ダムVC試験機を参考にして、鉛直方向のみに振動するようにして新たに作製した。このVC試験機を写真—1に、その仕様を以下に示す。



写真—1 VC 試験機 (小型)

1)振動数: 2000~6000 cpm, 2)振幅: 0.3~1 mm,

3)載荷重: 0~40 kg

また、このVC試験機は制御盤において振動数、振動時間が測定できる点に特徴がある。

4.2.2 VC 試験方法

VC試験方法は、振動数4000 cpm、振動1 mm、載荷重20 kgとして、小型容器($\phi 24 \times h 20 \text{ cm}$)の場合は40 mm以下のコンクリートを用い、大型容器($\phi 48 \times h 40 \text{ cm}$)の場合はフルサイズのコンクリートを用いて行なう。

試験の手順は「RCDコンクリート設計施工指針(案)10)」に準じて次のように行なった。

(1)容器に2層に分けてコンクリートを充填し、各層35回(大型の場合100回)ずつ突き固める。

(2)アクリル板と載荷重20 kgをコンクリート上面に載せる。

(3)振動を開始し、アクリル板下面全体にモルタルが接するまでに要する振動時間を測定し、VC値何秒と表示する。

4.3 配合設計方法

$G_{\max}=80$ mm の RCD コンクリートは大川ダム³⁾、島地川ダム⁴⁾で施工されているが、 $G_{\max}$ を 150 mm と大きくすると粗骨材が材料分離を生じる恐れが大きくなると考えられる。そこで、振動ローラによる転圧に支障がない範囲で材料分離が少ない配合とすることが重要となる。単位セメント量は、大川ダムおよび島地川ダムと同様に $C+F=120$ kg/m³ とし、フライアッシュ混入率は新中野ダム本体コンクリートと同様に $F/C+F=30\%$ とした。配合を支配する残りの要因である単位水量と細骨材率を決定する方針は「RCD コンクリート設計施工指針（案）¹⁰⁾」を参考にして、次のような手順で実験を行なった。

(1)モルタルの単位容積重量試験によって最適な単位水量を定める。

(2)フルサイズのコンクリートの大型 VC 値、施工ヤードで試験施工を行なって、その転圧状況、密度などを試験し、最適な細骨材率を定める。 $G_{\max}=80$ mm の配合は大川ダム、島地川ダムの配合を参考にして簡単な実験を行ない選定した。この配合を D-8 配合と呼ぶことにする。

4.4 モルタルの単位容積重量試験

4.4.1 試験方法

RCD コンクリート用モルタルの砂結合材比 $S/C+F$ を 3 種類、単位水量を 6 種類変化させて「モルタル単位容積重量試験¹⁰⁾」に準じて試験を行なった。試験手順は次のとおりである。

(1)Hobart 型 Model N-50 モルタルミキサで約 1.5 l のモルタルを練りまぜる。

(2)容積約 1 l のステンレス製容器に 2 層に分けてモルタルを充填し、各層を VC 試験機（振動数 4000 cpm、

振幅 1 mm）上で締固める。

(3)容器中のモルタル重量を測定して、モルタルの単位容積重量とモルタルの空げきを計算する。

4.4.2 試験結果および考察

実験結果を図-3 に示す。図-3 から、モルタルの単位容積重量を最大にするには、 $S/C+F$ にかかわらず単位水量を 200~210 kg/m³ にすれば良いことが分かる。モルタルの単位水量 200~210 kg/m³ を RCD コンクリートの単位水量に換算すると ($s/a=28\sim34\%$) 75~90 kg/m³ となる。大川ダム、島地川ダムの実績を参考にすると、単位水量は可能な限り多くした方が施工が良いことが報告されているので、コンクリートの単位水量は 85~90 kg/m³ に設定した。

4.5 最適細骨材率試験

4.5.1 試験方法

単位セメント量 ($C+F$) を 120 kg/m³ とし、単位水量は 4.4 の結果から 85、90 kg/m³ として、細骨材率を変えて試験を行なった。試験の流れを図-4 に示す。

試験項目は以下に示すようにした。

1)コンクリートの品質管理試験

(a)コンクリート温度、(b)小型 VC 値、(c)空気量、(d)密度および圧縮強度（標準供試体）、(e)大型 VC 値および密度

(a)~(d)は 40 mm 以下のコンクリートを用い、(e)はフルサイズのコンクリートを用いて行なった。

2)締固め試験中

試験ヤード（各ケースごとに幅 3 × 長さ 7 × 層厚 0.5 m）に RCD コンクリートを実際に施工して、その施工状況、表面沈下量、表面部の密度について試験した。

4.5.2 試験結果および考察

単位水量、細骨材率と VC 値の関係、単位水量、細骨材率とコンクリートの密度の関係をそれぞれ図-5、図-6 に示す。また、品質管理試験結果および施工状況を表-4 に示す。これらの結果から、小型 VC 値が標準的な範囲 10~30 秒であり、密度が大きいこと、施工性が良好なこと等を総合的に判断して単位水量 90 kg/m³、細骨材率 32% の D15-2 配合を選定した。この配合を今後 D-15 配合と呼ぶことにする。

$G_{\max}=150$ mm の D-15 配合、 $G_{\max}=80$ mm の D-8 配合、大川ダムおよび島地川ダムの配合を表-5 に示す。 α および β はセメントペーストの細骨材空げき充填率、モルタルの粗骨材空げき充填率のことであり、 $\alpha = \beta = 1$ の場合が理論上、空げきを満たす配合である。D-15、D-8 の配合を大川ダム、島地川ダムの配合と比較すると

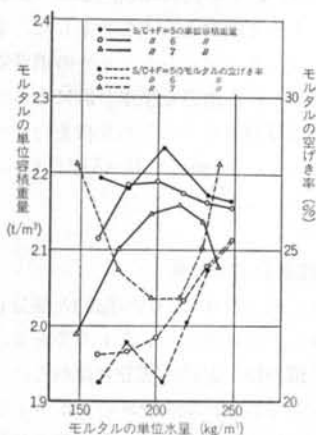
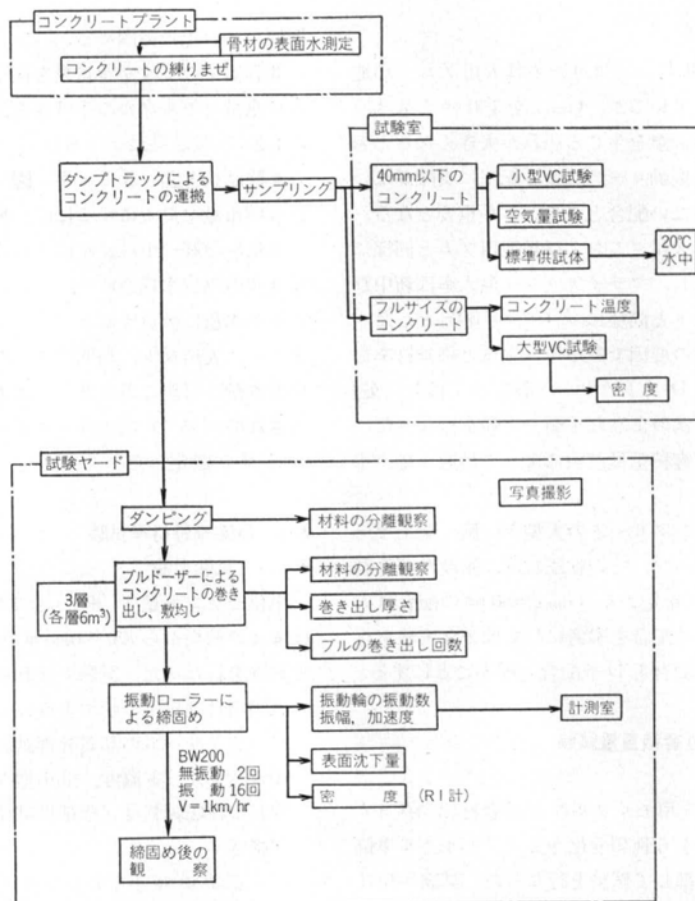


図-3 モルタルの単位水量と単位容積重量および空げき率との関係



図一 4 最適細骨材率試験の流れ
 α は小さく、 β は大きいようである。

§ 5. 水分管理実験

5.1 実験概要

コンクリートのコンシステンシー管理方法は図一 7 のように 2 種に分類され、一般的には砂の水分に着目してコンシステンシーの管理を行なう部分的コンシステンシー管理が行なわれている。RCD コンクリートは、単位水量が少なくコンシステンシーの管理が困難であるために、砂の表面水を管理する他に、全材料を投入した後ミキサの練りまぜ時の消費電力によって、コンシステンシーを管理する全体的管理（電力管理法）も併用した¹²⁾。

RCD コンクリートの単位水量と電力値との関係について検討した結果から、目的とする水分領域（90～100 kg/m³）においては、図一 8 に示すように変化は見られなかった。そこで、初期練りまぜにおいて砂、セメント、

骨材の小さいもの等のコンシステンシーに大きく影響を与える材料を投入して、単位水量の大きい状態のコンクリートで電力値が有意に変化する領域でコンシステンシー管理を行ない、その後に比較的水分の影響の少ない粗骨材を投入する 2 段投入方式を考案した。また、コンクリートのコンシステンシーをミキサの消費電力で管理する電力管理法と、静電容量型水分計によって砂の表面水を管理する部分的管理方法との比較を行なうとともに、D-8 配合 ($G_{\max}=80$ mm) と D-15 配合 ($G_{\max}=150$ mm) の比較も行なった。

5.2 実験結果および考察

図一 9 は、全体管理（電力管理計）と部分管理（静電容量型水分計）との比較を示したものである。全体管理における VC 値の標準偏差は部分管理のそれと比較すると約半分になっており、全体管理の方がコンシステンシーの管理精度が良いことが示された。部分的管理の精度が低い理由としては、砂の表面水を測定するのみで、粗骨

ダ ム 名	G_{max} (mm)	空気量 (%)	$\frac{W}{C+F}$ (%)	$\frac{s}{a}$ (%)	単 位 量 (kg/m ³)					α	β	単位粗骨 材容量 (m ³ /m ³)
					W	C+F	S	G	混 和 剤			
大 川 ダ ム ¹⁰⁾	80	1.5±1	85	32	102	120	691	1490	0.3	1.18	1.30	0.573
島 地 川 ダ ム ¹⁰⁾	80	1.5±1	87.5	34	105	120	752	1482	0.3	1.20	1.50	0.549
新 ダ 中 野 ム	D-8	80	1.5±1	79	95	120	723	1415	0.3	1.12	1.81	0.559
	D-15	150	1.5±1	75	90	120	685	1468	0.3	1.14	1.66	0.580

$$\text{注1) } \alpha = \frac{C/\gamma_c + F/\gamma_F + W/\gamma_W}{(1000/\omega_s - 1/\gamma_s) \cdot S} \quad \beta = \frac{C/\gamma_c + F/\gamma_F + S/\gamma_s + W/\gamma_W}{(1000/\omega_g - 1/\gamma_g) \cdot G}$$

ここに、C、F、S、G、W：単位量(kg/m³)

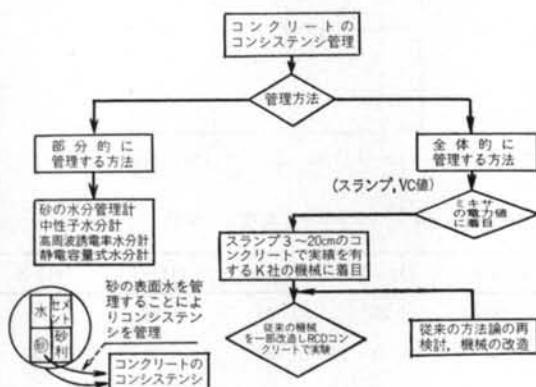
ω_s, ω_g ：細骨材の単位容積重量(kg/m³)

$\gamma_c, \gamma_F, \gamma_s, \gamma_g, \gamma_W$ ：比重

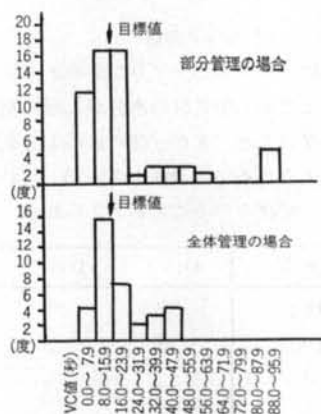
$$\text{単位粗骨材容積} = \frac{G}{1000\gamma_g}$$

注2) 混和剤はボソリス No. 8 である。

表—5 RCD コンクリートの配合比較表

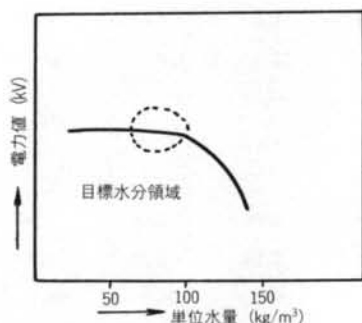


図—7 コンクリートのコンシステンシー管理方法



図—9 部分管理と全体管理の比較 (D-15配合)

た、 G_{max} が 150 mm と大きいとミキサの負荷変動が大きくなるために、管理精度が悪くなったことも一因と考えられる。したがって、RCD コンクリートのコンシステンシーを管理する方法として、材料を 2 回に分けて投入する電力管理法が実用的に使用できるものと考えられる。今後の課題として、砂の粒度、かつミキサの負荷曲線に及ぼす影響等について、検討する必要があると考えられる。



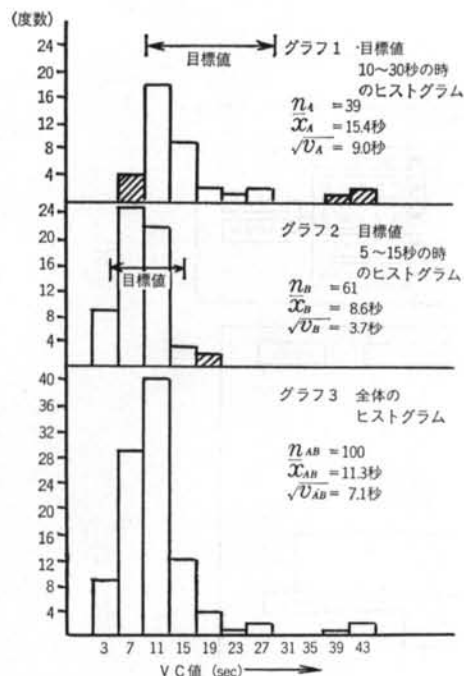
図—8 RCD コンクリートの単位水量と練りまぜミキサ電力値の関係

図—10、図—11は、配合別の VC の値のヒストグラムを示した。D-15 配合の VC 値の変動は D-8 配合に比べて大きい。これは、D-15 配合の単位水量が 90kg/m³ と D-8 配合より 5 kg/m³ 少ないために、水量の変化に対して VC 値の変動幅が大きくなったためと考えられる。ま

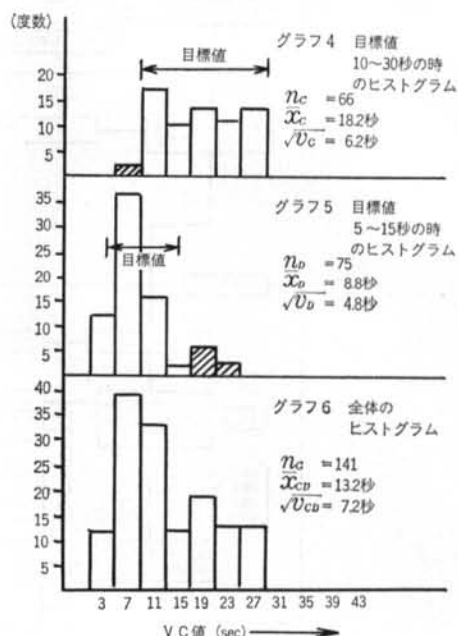
§ 6. 施工法確認実験

6.1 実験概要

アメリカの TVA 仕様書¹¹⁾、大川ダム³⁾、島地川ダム⁴⁾ および「RCD コンクリート設計施工指針(案)¹⁰⁾」のいずれにおいても RCD コンクリートに用いる粗骨材の最



図一10 D-8 配合のヒストグラム



図一11 D-15 配合のヒストグラム

試験時期	試験項目		試験方法	試験回数			
				1層目	2層目	3層目	4層目
コンクリートの品質管理	VC試験	小型VC値	容器: $\phi 24 \times h 20$ cm, 40mmふるいでウェットスクリーンしたコンクリート (4,000 cpm, 1mm, 20kg)	1	1	1	1
		大型VC値	容器: $\phi 48 \times h 40$ cm, フルサイズのコンクリート (4000 cpm, 1mm, 20kg)	1	1	1	1
	空気量		ワシントン型圧力式エアメーター, 40mmふるいでウェットスクリーンしたコンクリート, VC機で締固める	1	1	1	1
	標準供試体 (密度, 圧縮強度)		$\phi 15 \times h 30$ cm モールド, 40mm 以下のコンクリート, VC機で締固める	4本	4本	4本	4本
締固め試験中	撒き出し厚さおよび表面沈下量		レベル, スタッフで測定 試験区間 4 m 中の 5 点	各層ごと, および締固め 4 回ごと			
	締固め速度		試験区間 4 m 中の速度をストップウォッチで測定, データレコーダ併用	締固め回数ごと			
	振動輪	振動数・振幅	手持式振動計 加速度の波形分析併用	同上			
		加速度	振動輪に加速度計を取付ける (AS-20B)	同上			
	コンクリート中	加速度	加速度計をコンクリート中に埋設する (AS-20B, AS-10B)	同上			
		振動圧力	土圧計をコンクリート中に埋設する (BE-5KE, BE-10KE)	同上			
		内部温度	熱電対を埋設する	施工中から硬化後 2 週間程度			
	密度		R I 計で測定 試験区間 4 m 中の 3 点	締固め完了後			
硬化後コアボーリング	外観観察・密度		コアの外観を 5 段階評価カラーモルタルの厚さ測定, 写真撮影, 重量・直径・高さ測定	全コア			
	圧縮強度		G 8 シリーズ: $\phi 18 \times h 36$ cm コア, G15 シリーズ $\phi 33 \times h 66$ cm コア, 材令 28 日, 91 日	各ケース 6 本ずつ			

表一6 施工法確認実験の試験項目

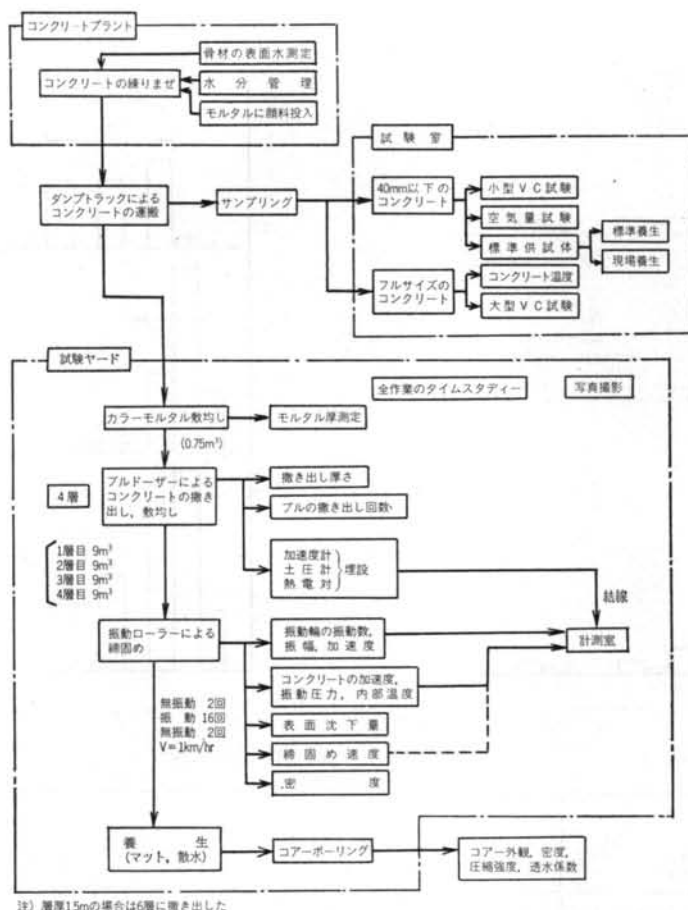


図-12 施工法確認実験の流れ図



写真-2 試験ヤードにおける施工実験

大寸法 (G_{max}) は 80 mm, 撒き出し厚さは 70 cm 程度以下としている。

本実験においては, 従来の実績より一段上を目指して G_{max} を 150 mm, 撒き出し厚さを 1 m とした場合の RC D コンクリートの物性および施工方法を検討することを目的とした。

以上のことを参考にして, 変動要因としては G_{max} , 層厚, 振動ローラの機種をとり上げ, 水準は G_{max} を

型 式		BW200	BW210DH	CA51 S
メーカ		Bomag	Bomag	Dynapac
種 別		自走式 4 輪振動	自走式 前輪振動	自走式 前輪振動
重 量 (kg)	作業時重量	7,000	11,000	15,000
	前輪重量 W_{1F}	3,500	6,700	10,300
	後輪重量 W_{1R}	3,500	4,300	4,700
振動数 n (cpm)		2,600	1,650	1,500
振 幅 $2a$ (cm)		0.2	0.326	0.36
起振力 F (kg)		16,000×2	20,000	22,000
寸 法 (cm)	全 長	198.0	556.3	586.5
	全 幅	252.0	269.2	235.0
	ローラー直径 D	80.0	151.1	172.4
	ローラー幅 B	190.0	213.4	213.0
最小回転半径 (cm)		0	513.0	510.0
走行速度 V (km/hr)		最適速度2	3~5	0~10
トータル線圧 (kg/cm)		102.6	125.1	151.6

表-7 振動ローラの仕様一覧表

80 mm, 150 mm, 層厚は 35 cm, 75 cm, 100 cm, 150 mm, 振動ローラの機種は 7 ton, 11 ton, 15 ton とした。

6.2 試験項目および試験の流れ

試験項目を表—6 に、試験の流れを図—12 に示す。試験は屋外試験ヤード（幅 3.5×長さ 10m）で行なった。試験状況を写真—2 に示す。また、使用した振動ローラの仕様を表—7 に示す。

6.3 実験結果および考察

6.3.1 品質管理試験結果

品質試験管理結果は表—8 に示すようで、VC 値は 20 ±10 秒にほとんどはっており、空気量も 1~2% と RC D コンクリートとして標準的な値であった。材令 91 日の標準供試体における密度は約 2.3 t/m³ であり、通常のダムコンクリートと同等の値であった。また、圧縮強度

は 100 kg/cm² 程度であり、目標値 80 kg/cm² を満足していた。

6.3.2 コア試験結果

硬化後、D-8 配合 ($G_{max}=80$ mm) の場合は $\phi 180$ mm, D-15 配合 ($G_{max}=150$ mm) の場合は $\phi 330$ mm のコアボーリングを行なった。コアの外観観察方法は、島地川ダムの例を参考にして以下のように 5 段階に分けて、各段階のコア長をコア全長に対する百分率で評価した。

SA: 優, A: 良, B: ほぼ良, C: やや不良,

D: 不良

表—8 から、コアの密度は層厚が小さいと大きくなる傾向が見られるが、 G_{max} , 層厚にかかわらず全体としては 2.3 t/m³ 以上得られている。

コアの圧縮強度は、材令 91 日で 70~100 kg/cm² であり、コアでも標準値をほぼ満足していた。D-8 配合の方が D-15 配合よりも大きい傾向がみられる。また、層

実験の種類		G8-1	G8-2	G8-3	G15-1	G15-2	G15-3	P-1	P-2	L-150
配合	種類	D-8	D-8	D-8	D-15	D-15	D-15	D-8	D-8	D-15
	G_{max} (mm)	80	80	80	150	150	150	80	80	150
施工条件	層厚 (m)	1	1	1	1	1	1	0.75	0.35	1.5
	撒き出し方法	薄層	薄層	薄層	薄層	薄層	薄層	薄層	薄層	薄層
振動ローラ	機種	BW200 (7 t)	BW210 DH (11 t)	CA51S (15 t)	BW200 (7 t)	BW210 DH (11 t)	CA51S (15 t)	BW200 (7 t)	BW200 (7 t)	BW200 (7 t)
	締固めエネルギー (kg・cm/cm)	323	180	310	463	214	339	334	323	558
品質管理試験	練り上がり温度 (°C)	3.0	4.3	5.6	7.9	8.8	10.4	6.2	5.0	21.0
	空気量 (%)	1.3	1.35	1.3	1.25	1.65	1.2	1.18	1.3	2.3
	VC 値 (秒)	小型	16	28	14	10	17	10	7.8	17.3
		大型	105	105	138	33	87	23.9	42	84
	標準供試体 (材令 91 日)	密度 (t/m ³)	2.31	2.30	2.34	2.32	2.30	2.30	2.32	2.27
		圧縮強度 (kg/cm ²)	95.0	98.2	120	95.7	111	101	102	122
コンクリート中の加速度 (G)	上層	3.04	1.90	2.16	2.88	1.63	1.63	2.92	3.94	4.84
	下層	0.45	0.47	0.41	0.47	0.36	0.27	0.70	2.48	0.38
コンクリート中の振動圧力 (kg/cm ²)	上層	3.58	4.64	5.69	1.09	3.93	5.94	1.74	2.00	2.83
	下層	0.70	1.35	1.71	0.87	1.41	2.02	1.02	1.70	0.47
表面沈下率 (%)		5.6	5.7	6.3	5.3	4.8	5.9	7.1	11.1	3.5
コンクリート内部温度上昇		11.6	8.5	10.5	8.7	8.0	6.5	9.2	4.8	11.8
コア供試体 (材令 91 日)	外観観察結果 (B以上の%)	89.8	69.6	99.3	97.7	88.7	97.7	91.8	100	50.3
	密度 (t/m ³)	2.33	2.35	2.34	2.33	2.36	2.37	2.37	2.40	2.30
	圧縮強度 (kg/cm ²)	100	91.3	95.6	69.7	77.3	77.1	82.5	99.4	81.1
	TDM (cm)	0.80	1.69	2.12	1.05	1.85	2.29	0.89	1.09	1.38

表—8 施工法確認実験の結果

厚の違いによる圧縮強度の差は小さいが、コア外観観察結果から、層厚 1.5m (L-150) では B (普通) 以上が少なく、層厚 1m と比較すると外観上締固め程度が悪くなっていると考えられる。

6.3.3 振動伝ば性状

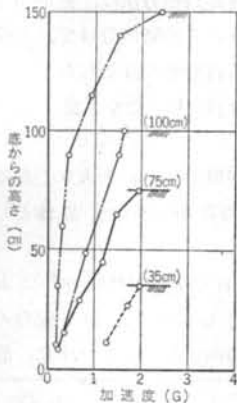


図-13 コンクリート中の加速度分布性状



図-14 コンクリート中の振動圧力分布性状

RCD コンクリートの振動締固め性状を検討するために、コンクリート中に加速度計および土圧計を埋設して締固め中の加速度および振動圧力を測定した。その結果を表-8に示す。上層は天端から約 10 cm の位置、下層は底から約 10 cm の位置における測定値であり、全転圧回数の平均値で示した。

測定された加速度波形は完全な正弦波でないために、総括的に評価する目的で実効値を用いた。実効値は、レベルレコーダで記録した加速度レベル $L(a)$ から次式を用いて求めた。

$$L(a) = 20 \log \frac{a}{a_0} \quad \dots\dots(1)$$

ただし、 $L(a)$: 加速度レベル (dB)

a : 加速度実効値 (G)

a_0 : 加速度基準値 ($a_0 = 0.1G$)

加速度および振動圧力の深さ方向の分布性状を、図-13、図-14に示す。

表-8に示すように、下層部の加速度は振動ローラが大きいほど小さく、振動圧力は逆の傾向が見られた。層

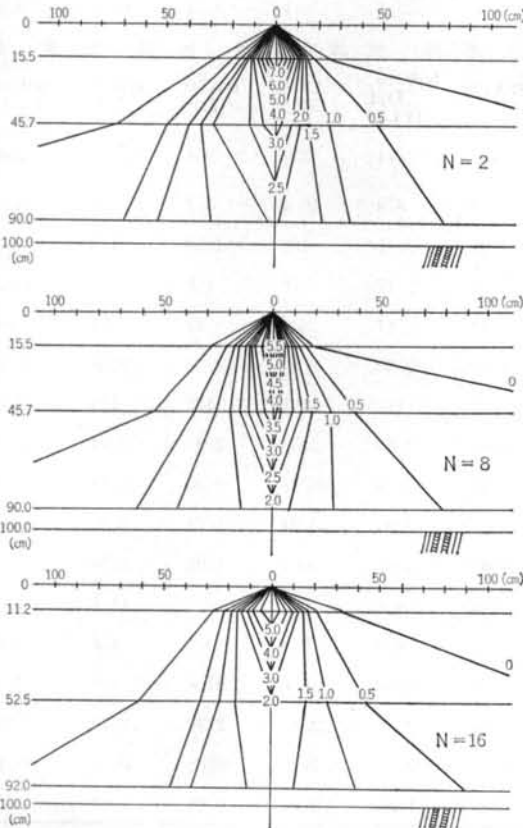


図-15 振動圧力球根図 ($G_{max} = 80 \text{ mm}$)

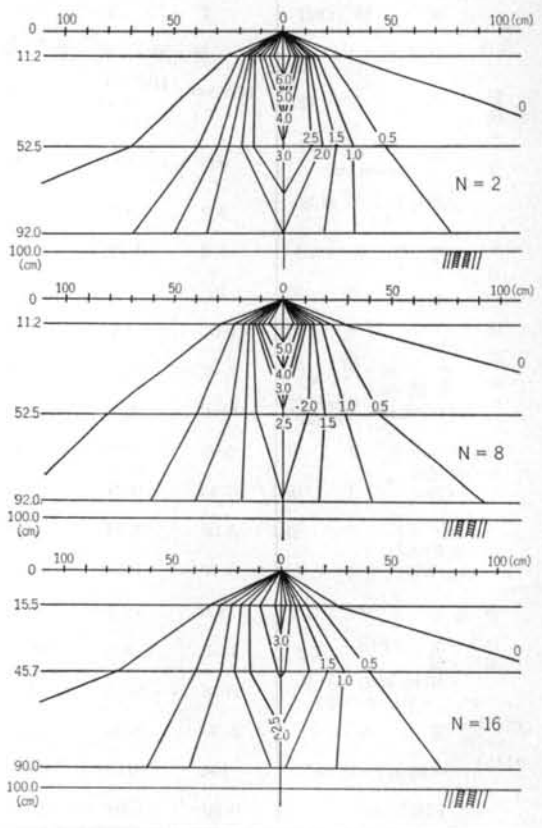


図-16 振動圧力球根図 ($G_{max} = 150 \text{ mm}$)

厚1mにおいて下層の加速度は上層の15~25%程度であり、下層の振動圧力は上層の20~35%程度であった。また、深さ方向の分布は図-13、図-14に示すように、加速度振動圧力とも層厚が厚くなると左側に移動する。すなわち、急激に減少する傾向が示された。

各測定位置で得られた振動圧力と時間との記録から、振動ローラ進行方向の圧力の深さ方向分布状態を知るために圧力球根を描いた(図-15、図-16)。圧力球根は深さ方向に長い円形であり、水平方向より深さ方向の伝ば特性が良いことが分かる。

コアの試験結果から密度、圧縮強度とも所要の品質を満たしており、層厚1mの下層部における振動圧力は 0.7 kg/cm^2 以上、加速度は $0.27G$ 以上伝ばしている。

Forssblad は、振動締固めに有効な振動圧力は $0.5 \sim$

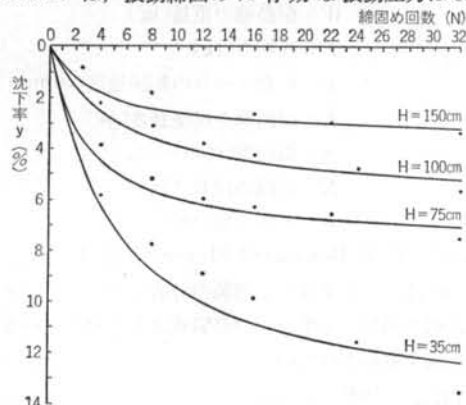


図-17 締固め回数と沈下率の関係 (D-8 配合, BW200 振動ローラ)

1 kg/cm^2 程度必要である述べているが¹⁸⁾、本実験結果はこの範囲に入っているため、Forssblad の値は妥当なものと考えられる。

振動締固めは加速度と振動圧力の相乗作用であると考えられるので、その下限値は今後の検討課題であると考えられる。

6.3.4 表面の沈下特性

締固めによって生じた沈下量を締固め前の層厚で除して、沈下率で評価し、締固め回数ごとに測定した。締固め回数は振動輪の通過回数のことであり、前後輪が振動輪である BW200 振動ローラの場合は1回の転圧で2回締固めを行なったことになる。表-9、図-17に締固め回数と沈下率の関係を示した。締固め回数(N)と沈下率(y)は、双曲線 $y = N/(a + bN)$ で近似されることが明らかになった。 y_N は締固め終了時の沈下率であり、最終沈下率と呼び、 y_{∞} は締固め回数 $N \rightarrow \infty$ としたときの沈下率であり、極限沈下率と呼ぶ¹⁴⁾。これらの結果から

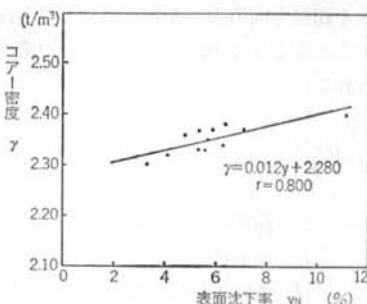


図-18 表面沈下率とコア密度の関係 (材令91日)

	$G_{\max}$ (mm)	層厚 (cm)	振動ローラ (ton)	転圧回数 N	沈下率曲線 y	極限沈下率 y_{∞} (%)	最終沈下率 y_N (%)	$\frac{y_N}{y_{\infty}}$
G8-1	80	100	7	32	$y = \frac{N}{0.1651N + 0.8731}$	6.06	5.20	0.86
G8-2	80	100	11	16	$y = \frac{N}{0.1434N + 0.4977}$	6.97	5.73	0.82
G8-3	80	100	15	16	$y = \frac{N}{0.1424N + 0.2364}$	7.02	6.36	0.91
G15-1	150	100	7	32	$y = \frac{N}{0.1705N + 0.5929}$	5.87	5.29	0.90
G15-2	150	100	11	16	$y = \frac{N}{0.1872N + 0.4415}$	5.34	4.66	0.87
G15-3	150	100	15	16	$y = \frac{N}{0.1469N + 0.3245}$	6.81	5.98	0.88
P-1	80	75	7	32	$y = \frac{N}{0.1292N + 0.3691}$	7.74	7.11	0.92
P-2	80	35	7	32	$y = \frac{N}{0.0678N + 0.3484}$	14.3	12.4	0.87
L-100	150	100	7	32	$y = \frac{N}{0.2380N + 1.0654}$	4.20	3.69	0.88
L-150	150	150	7	32	$y = \frac{N}{0.2877N + 0.9787}$	3.48	3.14	0.90
平均								0.88
標準偏差								0.029

表-9 表面沈下率曲線

実験ケース 項目	G8-1	G8-2	G8-3	G15-1	G15-2	G15-3	P-1	P-2	L-100	L-150	C-8	C-15
締固め前の密度 ¹⁾ (t/m ³)	2.05	2.07	2.07	2.27	—	2.14	2.20	2.22	2.16	2.18	2.19	2.21
締固め後の密度 ¹⁾ (t/m ³)	2.26	2.23	2.26	2.28	—	2.25	2.33	2.31	2.32	2.26	2.32	2.33
表面沈下率 (%)	5.6	5.7	6.3	5.3	4.8	5.9	7.1	11.1	4.1	3.3	6.4	5.4
算定密度 ²⁾ (t/m ³)	2.17	2.20	2.21	2.40	—	2.27	2.37	2.50	2.25	2.25	2.34	2.34

注1) R I 計による測定密度、注2) 算定密度 $\gamma = \frac{1}{1-y/100} \cdot \gamma_0$

y: 沈下率 (%)

γ_0 : 締固め前の密度 (t/m³)

表—10 算定密度

沈下率には配合による影響は見られないが、層厚が大きくなると小さくなる傾向が見られる。また、最終沈下率 y_N と極限沈下率 y_∞ との比 y_N/y_∞ は層厚にかかわらずほぼ一定の値であり、平均 88% であった。図—18 はコア密度と最終沈下率との関係を示したもので、沈下率が大きくなるとコア密度が増加する傾向が示される。

締固めにおいて、沈下率と密度の関係は明確にとらえられていないのが現状である。そこで、締固めによって生じる沈下量を鉛直方向のみの変形と考えて横方向への流動を無視すると仮定すると、締固め終了後の密度 γ は次式で表わされる。

$$\gamma = \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta l}{l} \right)} \cdot \gamma_0 \quad \dots\dots(2)$$

ただし、 γ_0 : 締固め前の密度

Δl : 変形量

l : 締固め前の厚さ

上式の $\Delta l/l$ は沈下率に相当するために密度と沈下率の関係は次式となる。

$$\gamma = \frac{1}{1 - y} \cdot \gamma_0 \quad \dots\dots(3)$$

ただし、y: 沈下率/100

密度の測定はラジオアイソトープを用いた表面型密度水分計 (RI 計) を使用した。式(3)から算定した密度を表—10に示す。実測密度と算定密度の平均値の差の検定を行なうと有意差は見られず、両者は同じ平均値を持つ分布をしていることが分かった。

したがって、表面沈下率はコンクリートの密度と関係があり、表面沈下率によって密度も管理できる可能性があることが明らかになった。

6.3.5 締固めエネルギー

振動締固めエネルギーは次の2種の方法が提案されている。

(1) 締固めエネルギー¹⁵⁾

振動ローラの締固めエネルギーは振動ローラの振幅、振動数、締固め速度等の実測値から、谷本の式を基に締

固め回数を考慮した次式が提案されている。

$$E = 2a \left(W + \frac{F}{2} \right) \frac{L}{V} \cdot n \cdot N \cdot \frac{1}{BL} \quad \dots\dots(4)$$

ただし、E: 締固めエネルギー (kg・cm/cm²)

a: 振動輪の片振幅 (cm)

W: 振動輪の重量 (kg)

F: 起振力 (kg)

V: 振動ローラの転圧速度 (cm/min)

L: 振動輪の接地長さ (cm)

n: 振動数 (cpm)

N: 締固め回数 (回)

B: 締固め幅 (cm)

(2) TDM (Total Downward Movement)¹⁵⁾

TDM は、コンクリート舗装の分野でフィニッシャの振動締固め効果を示す一つの経験式として用いられており、次式で表わされている。

$$\text{TDM} = \frac{2naL}{V} = 2nat \quad \dots\dots(5)$$

ただし、n: 振動数 (cpm)

a: 片振幅 (cm)

V: 締固め速度 (cm/min)

t = L/V (min)

両式で算定した結果を表—8に示す。これらの結果から、BW 200 振動ローラは他のローラよりも大きい締固めエネルギーが得られることが分かる。また、TDM は振動ローラが大きくなると増加する傾向が見られる。

したがって、本実験ではコアーの密度 2.3 t/m³ 以上が得られているので、締固めエネルギーとしては 180 kg・cm/cm²、TDM 0.8 cm 以上であれば、十分な締固めが得られるものと考えられる。

§ 7. RCD コンクリートの上下部の品質相違検討実験

7.1 実験概要

大川ダム、島地川ダムにおいて、RCD コンクリート

1層内の上部と下部に強度差のあることが報告されている。また、振動ローラの振動により締固め直後に表面にひびわれが生じ、これがコンクリートの品質に悪影響を及ぼすことが考えられるので¹⁶⁾、これらについて検討を行なった。

要因は配合のみとし、 $G_{\max}=80\text{ mm}$ の配合(D-8 配合)および $G_{\max}=150\text{ mm}$ (D-15 配合)について行なった。層厚は標準的な 70 cm とし、振動ローラは BW 200 (7 ton) を用いた。

7.2 実験方法

7.2.1 表面ひびわれ深さ測定実験

振動ローラで締固めた直後のひびわれ深さを、けい光染料水溶液を浸透させる方法で測定した。実験の手順を以下に示す。

(1)転圧直後の表面に、 $60\times 60\times$ 高さ 5 cm 程度の堤を設ける。

(2)堤内にけい光染料水溶液(プライマル:水=1:1の溶液にけい光染料を重量比1%投入してかくはんした)を約2時間満たして、コンクリート中に浸透させる。使用したけい光染料は日本蛍光化学特製であり、プライマル M-30 は日本アクリル化学特製のものである。

(3)材令28日でコアボーリングし、コアをダイヤモンドカッタで切断した後に、ブラックライトを照射してけい光染料の分布状態を測定する。

7.2.2 上下部の品質相違測定実験

打設した層の上下部の品質の相違は、コンクリートコアに炭酸ガスを圧入し、各高さの中性化面積を測定して

評価した。実験手順を以下に示す。

(1)材令28日でコアボーリングを行ない、このコア供試体に炭酸ガスを 3 kg/cm^2 の圧力で3時間圧入する。

(2)コアを半割れにした面にフェノールフタレインを散布し、中性化した部分を測定して中性化率を求める。中性化率はコア全長約 70 cm を10分割して、各部分について測定した。

7.3 実験結果および考察

7.3.1 表面ひびわれ深さ測定結果

表面部におけるけい光染料含浸状況を図-19に、含浸

	コアNo	含浸面積 (cm^2)	コア幅 (cm)	含浸深さ (cm)
$G_{\max}=80\text{ mm}$	F-1	18.0	18.0	1.0
	F-2	20.8	18.0	1.2
	F-3	14.0	18.0	0.8
	F-4	23.1	18.0	1.3
	F-5	12.4	18.0	0.7
	F-6	14.5	18.0	0.8
	平均	17.1	18.0	1.0(0.24)
$G_{\max}=150\text{ mm}$	F-1	8.4	18.0	0.5
	F-2	—	—	—
	F-3	7.0	18.0	0.4
	F-4	7.7	18.0	0.4
	F-5	6.2	18.0	0.3
	F-6	13.7	18.0	0.8
	平均	8.6	18.0	0.5(0.19)

注) かっこ内は標準偏差である

表-11 表面部におけるけい光染料含浸深さ測定結果

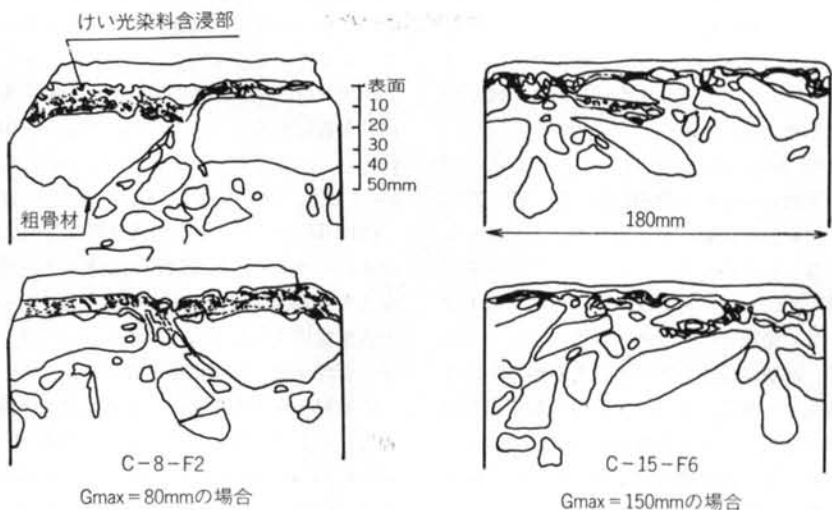


図-19 けい光染料含浸状況

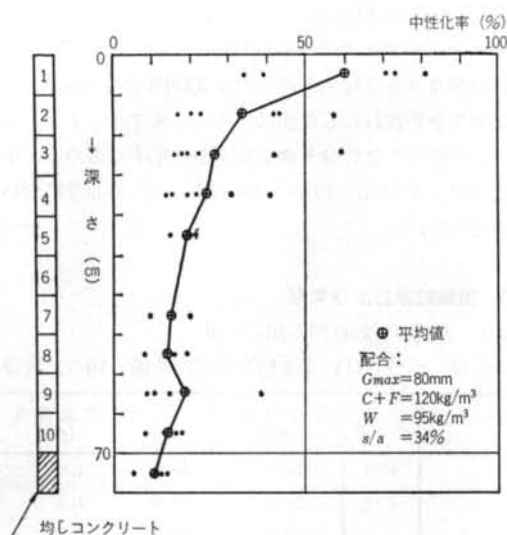


図-20 D-8 配合の深さ方向中性化率

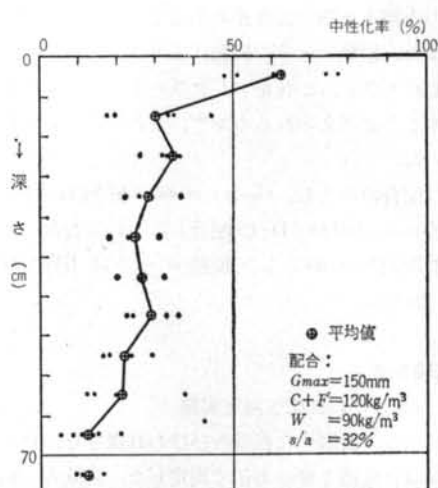


図-21 D-15 配合の深さ方向中性化率

配合	G_{max} (mm)	$\frac{W}{C+F}$ (%)	$\frac{F}{C+F}$ (%)	$\frac{s}{a}$ (%)	単位量 (kg/m³)					
					W	C	F	C+F	S	G 混和剤
D-8	80	79	30	34	95	84	36	120	723	1415 0.3
D-15	150	75	30	32	90	84	36	120	685	1468 0.3

表-12 配合表

深さ測定結果を表-11に示す。表層の約1cm程度は、配合の種類にかかわらず一様にけい光染料が含浸しており最大でも5cm程度であって、表層部のひびわれはそれほど深くないことが明らかとなった。また、表層部の粗骨材とモルタルの境界にも含浸している様子が認められた。この種のひびわれは、粗骨材とモルタルの密度が異なるために、拘束の弱い表層部では粗骨材とモルタルの動きが別々になり、付着が悪くなって生じたものと考えられる。また、RCD コンクリートは一般のコンクリートより粘性が小さいために、表面部のひびわれが残りやすいことも一因と考えられる。

7.3.2 上下部の品質の相違測定結果

コアの中性化率測定結果を配合別に図-20、図-21に示す。中性化率は配合の種類にかかわらず、上部ほど大きいことがわかる。したがって、一般のコンクリート¹⁷⁾と同様に、RCD コンクリートにおいても打込み面上部はブリージング等の影響でポロシチーが大きくなって中性化率が大きく、品質が低下していることが明らかになった。この中性化率の測定により、上下部の品質の相違を連続的に検討できることが示された。また、 $G_{max}=80\text{mm}$ のコアにおいて上下部に強度差がみられ、中性化率の分布と同様の傾向が示された。 $G_{max}=150\text{mm}$ の場合は供試体が $\phi 33 \times h 66\text{cm}$ のために1層からコアが1本しか

採取できなかったため、上下部の圧縮強度差については検討できなかった。

§ 8. まとめ

新中野ダム減勢工部にRCD コンクリートを施工するのに先立って行なった施工実験の結果をまとめると、以下のようである。

(1)粗骨材の最大寸法(G_{max})150mmを用いた配分(D-15)を選定することができた。 $G_{max}=80\text{mm}$ の配合と比較すると、単位セメント量が同じものにもかかわらず、 s/a で2%、単位水量で5kg/m³少ない(表-12)。

(2)RCD コンクリートの水分管理方法は、細骨材の表面水のみでなく、粗骨材の表面水をも含めた全体的管理をミキサの消費電力を用いて、さらに粗骨材の2段投入方式を採用することによって、コンシステンシーを精度よく管理することが可能となった。

(3)層厚1mの施工条件においては、下層(底から10cm程度)における振動圧力および加速度はそれぞれ0.7kg/cm²、0.3G程度以上であり、これらの振動圧力および加速度が繰り返し加えられることによって締固めが下層部まで進み、所要の品質のコンクリートが得られるも

のと考えられる。

(4)表面の沈下率と転圧回数の関係は双曲線で近似され沈下率は層厚が大きくなると小さくなり、振動ローラが大きくなると大きくなる傾向が見られる。しかし、最終沈下率 y_N と極限沈下率 y_∞ の比 y_N/y_∞ をとると層厚、振動ローラにかかわらずほぼ一定の値となることが明らかになった。

(5)沈下率と密度には良好な関係があるので、沈下を鉛直方向の変形のみと考え、締固め前の密度と沈下率から締固め終了時の密度をある程度推定できると思われる。

(6)層厚 1 m において締固めエネルギーおよび TDM は所要の品質を満足するにはそれぞれ $180 \text{ kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$ 、 0.8 cm 程度以上必要であると思われる。しかし、現在のところ締固め程度を締固め終了直後に判定する指標となるものは無く、今後の検討課題として残されている。

(7)RCD コンクリートの上部の品質が下部より劣ることの原因として、上部の粗骨材とモルタルの付着が十分

でないこと、上部がブリージング等の影響でボロシチーが大きいことが上げられる。

(8)施工実験結果から、 $G_{\max}=150 \text{ mm}$ および層厚 1 m の条件において、材令 91 日のコアの密度 $2.3 \text{ t}/\text{m}^3$ 、圧縮強度 $80 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 程度の RCD コンクリートを施工できることが示され、目標値を満足する施工方法を確立することができた。

今後の課題としては、現場施工実験でできなかったコンクリート温度、および締固め開始までの時間が締固め性状に及ぼす影響をとらえることがあり、また締固め機構を解明し締固め程度の評価方法を確立することなどが挙げられる。

本実験を行なうにあたり、ご指導いただいた北海道函館土木現業所新中野治水ダム建設事務所の佐藤所長および南係長、武蔵工業大学国分正胤教授、コンクリートダムの合理化施工に関する研究委員会の方々およびご協力を賜った本工事関係者に深く感謝の意を表する。

<参考文献>

- 1) 広瀬, 山住: "RCD(Roller Compacted Dam) コンクリートについて" 土木施工 18巻, 15号 (1977.11)
- 2) 阪西徳太郎: RCC (Roller Compacted Concrete) について" 建設の機械化 (1976.12)
- 3) 小宮山克治: "大川ダムのマット部における RCD コンクリート" セメントコンクリート No. 407 (1981.1)
- 4) 鈴木, 坂田: "RCD コンクリートの諸問題—島地川ダムにおける合理化施工—" セメントコンクリート No. 399(1980.5)
- 5) (財)国土開発技術研究センター: "RCD 工法技術指針(案)" (1981.7)
- 6) "Rolled Concrete for Dams" CIRIA (1981.6)
- 7) 根上, 嶋田, 奥村: "150 mm の粗骨材を用いた RCD コンクリート" セメントコンクリート No. 420 (1982.2)
- 8) "Roller Compacted Concrete" Journal of ACI, Vol. 77, No. 4 (1980)
- 9) Horace A. Johnson, Paul C. Chao: "Rollcrete Usage at Tarbela Dam" Concrete International (1979.11)
- 10) (財)国土開発技術研究センター: "RCD コンクリート設計施工指針(案)" (1979)
- 11) Tennessee Valley Authority, Division of Engineering Design All Projects: "For Roller-Compacted Concrete (General Construction Specification, No. G-48)"
- 12) 嶋田, 矢花, 小野: "コンクリートのコンシステンシー管理方法に関する研究" 土木学会第36回年次学術講演会講演概要集第5部 (1981.10)
- 13) Lars Forssblad: "Betongvibrensens Reologi och Mekanism" Nordisk Betong (1978.4)
- 14) 立入, 石井, 藤原: "室内および現場における粗粒材の振動締固め実験" 土と基礎 Vol. 22, No. 4 (1974.4)
- 15) (財)国土開発技術研究センター: "RCD 工法によるダム施工" (1981.7)
- 16) 奥村, 南, 堤: "RCD コンクリートの上下部の品質の相違に関する研究" 土木学会第36回年次学術講演会講演概要集第5部 (1981.10)
- 17) 上村克郎: "人工軽量骨材コンクリートの中性化" セメントコンクリート No. 273 (1969)

