

RCD コンクリートの締固め性状に関する一研究

栗田 守朗 小野 定
(土木技術部)
 奥村 忠彦 嶋田 洋
(北海道支店)
 林 亮
(土木技術部)

§ 1. はじめに

RCD(Roller Compacted Dam) コンクリートは、単位セメント量が 120 kg/m³程度と少なく、超硬練りのコンクリートをダンプトラック等で運搬し、ブルドーザ等で撒き出し振動ローラで締固めて造るコンクリートである。

この工法は、我が国ではコンクリートダム of 合理化施工法の一つとして建設省を中心に開発が進められ、海外でも研究されている。我が国では、大川ダムのマット部¹⁾、および島地川ダム本体²⁾の施工を通じてその施工法が一応体系化されたといえる³⁾。また、新中野ダム減勢工部では、粗骨材の最大寸法 (G_{max}) 150 mm、層厚 1 m の条件で RCD コンクリートを施工し、RCD 工法の適用範囲を拡大する研究を行なった⁷⁾。現在、玉川ダム⁴⁾で試験施工が行なわれており、美利河ダム⁵⁾においても RCD 工法で施工する準備が進められ、今後とも RCD 工法を採用するダムが増加するものと考えられる。

海外の動向は、1983年3月にロスアンゼルスで開催された ACI (American Concrete Institute) 年次大会において、「RCC シンポジウム」⁶⁾ がもたれ、各国から報告があった。その中で、ダム全体を RCD コンクリートで施工した例として Willow Creek Dam (堤高 53m、コンクリート容積 30万 m³) がアメリカから報告された。このダムは、ロックフィルで計画されていたが、RCD コンクリートに設計変更したものであり、それによって工費が約50%、工期が半分以下になり、大幅なコストダウンがなされた。さらに、アメリカでは Upper Stillwater Dam (堤高 83m、コンクリート容積 100万 m³) 等に適用される計画が報告された。この会議を通じて、日本とアメリカにおける RCD コンクリートに関する考え方の相違が明らかになり、両国の特性を活かして今後も研究していくことが確認された。日米の RCD コンクリートの大きな違いの一つは1層の厚さである。すなわち、アメリカではダム建設地が広いために層厚は 30 cm 程度と小さくし、日本では谷が狭いこと等から能率を上げるため

に層厚を 70cm 以上と大きくしている。この相違のために、我が国では厚い層の下部のコンクリートの締固め方法、および締固め管理方法が重要な課題とされている。

本報告は、前報⁷⁾ において残された課題について検討したものである。

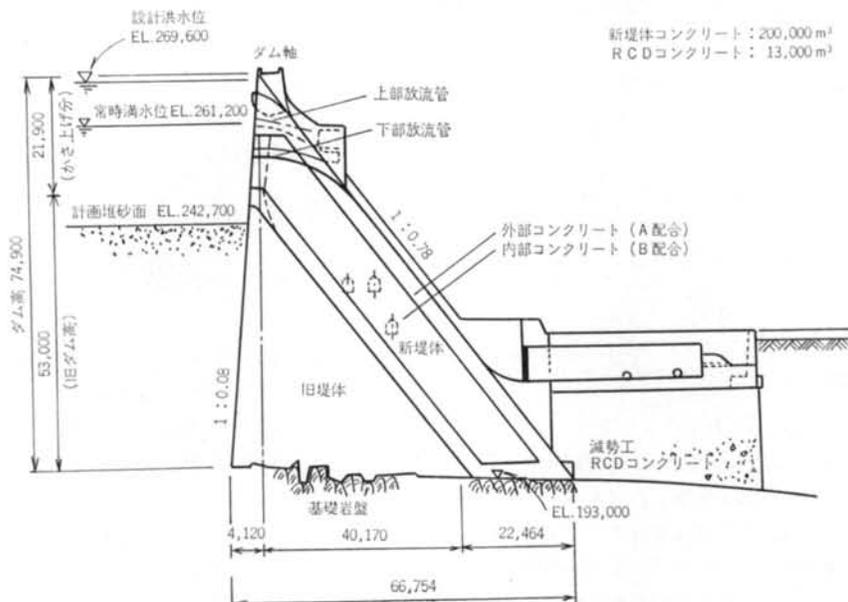
§ 2. 研究の目的

本報告は、新中野ダム減勢工部において従来の実績を上回る条件 ($G_{max}=150$ mm、層厚 1m) で材令91日の圧縮強度 80 kg/cm²、密度 2.3 t/m³ を満たす RCD コンクリートを施工すること、締固め性状測定結果および室内実験結果に基づいて RCD コンクリートの締固め性状を明らかにすることを目的としている。また、RCD コンクリートの他の物性 (水密性、耐久性、温度特性等) を把握することも目的としている。

§ 3. 新中野治水ダムの概要

新中野ダムは、函館市効外亀田川の既設の中野ダムをコンクリート体積約 20 万 m³ で 21.9m 嵩上げして造る重力式コンクリートダムである。1978年8月から本体工事が始まり、1984年3月完成を目指して工事が進められている。ダムの諸元を表-1、断面を図-1に示す。

本体のコンクリート打設は、従来多く用いられているケーブルクレーンを使わずにダム軸に平行に鋼製のトレスルを構築して、この上を走行する軌道式トランスファーカー、ジブクレーンによって行なった。パッチャラントからジブクレーンに吊り下げたポケットまでは、コンクリートを軌道式トランスファーカーで運搬している。つまり、パッチャラントから打設地点までのコンクリートの運搬は、トランスファーカーおよびジブクレーンのオペレータの2人で行なうという省力化を図っている点に特徴がある。この減勢工部には、以下の理由により RCD



図一 新中野治水ダム断面図

	新 堤 体	旧 堤 体
形 式	重力式 コンクリートダム	重力式 コンクリートダム
堤 高	74.9m	53.0m
堤 頂 長	248.0m	162.0m
堤 頂 幅	4.0m	3.0m
上 流 面 勾 配	1 : 0.08	1 : 0.08
下 流 面 勾 配	1 : 0.78	1 : 0.78
堤 体 積	増加分 201,000 m³	75,400 m³
非越流部標高	E. L. 270.9 m	E. L. 249.00m
越流部標高	E. L. 257.30m	E. L. 246.00m
基礎岩盤標高	E. L. 196.00m	E. L. 196.00m
地 質	安山岩	安山岩
放 流 設 備	オリフィス 2.00×2.00m	排泥管 φ1,200mm
取 水 設 備	1基	1基
溢 水 面 積	0.175km²	0.077km²
総 貯 水 量	3,340千m³	764千m³
有 効 貯 水 量	2,820千m³	600千m³
洪水調節容量	1,740千m³	—
既設上水道容量	600千m³	600千m³
夏期不特定容量	480千m³	—
冬期不特定容量	1,280千m³	—
サーチャージ容量	940千m³	—
最 低 水 位	E. L. 242.70m	E. L. 229.50m
夏期制限水位	E. L. 255.00m	—
常 時 満 水 位	E. L. 261.20m	E. L. 246.00m
洪水時満水位	E. L. 267.30m	—
設 計 洪 水 位	E. L. 269.60m	—

表一 新中野治水ダムの諸元

コンクリートを打設することになった。

①河床部に基礎岩盤まで深さ20mにわたって推積している砂れき層をコンクリートで置換する必要がある。

②コンクリートは減勢池の水重、および導流壁の重量による不等沈下を防ぐ支持力が必要である。

③ジブクレーンのサービスエリアからはずれるので、コンクリートの運搬はダンプ、トラック等で行う必要がある。

④通常のダムコンクリートより経済的である。

上述のように、RCDコンクリートに要求される性能が低いので、粗骨材の最大寸法を150mmと大きくし、層厚も1m程度に大きくしたRCDコンクリートを実験的に施工することになった。

§ 4. 減勢工部における施工概要

4.1 施工規模

新中野ダム減勢工基礎部は複雑な形状であるが、幅25～33×長さ35×高さ16mであり、コンクリート総量は約13,000m³である。

4.2 使用材料および配合

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(株)上磯工場製の中庸熟フライアッシュセメント(F/C+F=30%)を用いた。細骨材および粗骨材はそれぞれ砕石であり、粒度分布は図

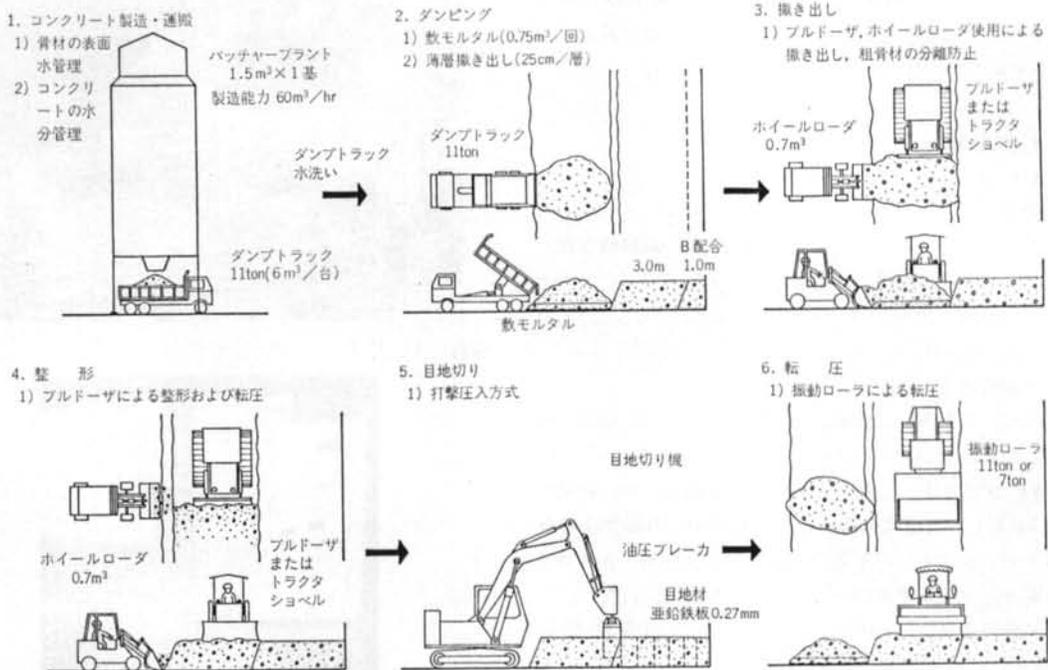


図-2 施工の流れ図

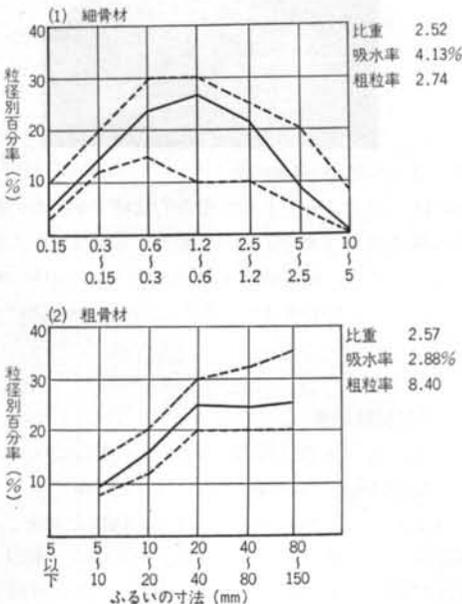


図-3 骨材の試験成績表

配合	粗骨材の最大寸法(mm)	W/C+F (%)	F/C+F (%)	S/a(%)	単位水量(kg/m ³)						
					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-2 配合

—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を(C+F)×0.25%用い、また暑中には(C+F)×0.5%用いた。

使用した配合は、施工実験⁷⁾で選定されたD-8配合($G_{max}=80$ mm)とD-15配合($G_{max}=150$ mm)であり、両配合を表-2に示す。

4.3 施工方法

減勢工部のRCDコンクリートは、図-2に示すような方法で施工した。また、層厚は0.7mと1m、振動ローラは7ton(BW 200)と11ton(SV 90D)の2機種とし、各々組合せた条件で施工した。その際、大粒径の粗骨材の分離を防止するために、ブルドーザで撒き出す方向と直角方向に作業ができるタイヤ式ホイールローダを採用し、傾斜面をころげ落ちた粗骨材をすくい上げて再度ブルドーザで撒き出す方法を採用した。施工状況を写真-1に示す。

1980年5月～10月の6か月間で約13,000m³のRCD

コンクリートを19層に分けて打設した。打設間隔は10日であった。また、1月のコンクリート打設量の最大は約1,000 m³で、打設速度は最大 55 m³/hr であった。

4.4 試験方法

4.4.1 コンシステンシー試験方法

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 VC 試験機を用いた。この VC 試験機の仕様を以下に示す。

- ・振動数：2000～6000 cpm
- ・振 幅：0.3～1 mm
- ・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、振幅、振動時間が測定できる点に特徴がある。

VC 試験方法は、振動数 4000 cpm、振幅 1 mm、載荷重 20 kg として、小型容器 ($\phi 24 \times h 20$ cm) の場合は 40 mm 以下のコンクリートを用い、大型容器 ($\phi 48 \times h 40$ 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)⁶⁾」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。

大型 VC 試験状況を写真一2に示す。

4.4.2 締固め性状試験

(1)加速度：振動締固め中の加速度を測定するために、振動輪およびコンクリート中に加速度計を設置した。コンクリート中には上層部(天端から約10cm)、中層部(天端から約50cm)そして下層部(底から約10cm)の3個所に埋設し、各転圧回数毎に測定した。

(2)振動圧力：土圧計は、加速度計と同じ位置に3箇所埋設し、各転圧回数毎に測定した。

(3)表面沈下量：撤き出し終了後、転圧回数毎に表面部の沈下量をレベルで測定した。

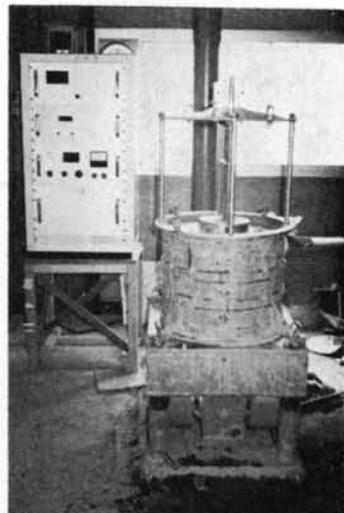
§ 5. 減勢工部試験結果

5.1 品質管理試験結果

40 mm のふるいでウェットスクリーンしたコンクリートを用いて試験した品質管理試験結果を表一3に示す。小型 VC 値は 15±5 秒に入っており、空気量も 1～2%



写真一1 RCDコンクリート打設状況



写真二 大型 VC 試験状況

と RCD コンクリートとして標準的な値であった。材令 91日の密度は D-8 配合、D-15 配合とも 2.3 t/m³ を満足している。また、圧縮強度は D-8 配合では 110 kg/cm²、D-15 配合では 121 kg/cm² であり、目標値 80 kg/cm² を満足していた。

5.2 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 でコアボーリングを行ない、整形後材令91日で3個以上試験した。試験結果を表一3に示す。これらの結果から、層厚1mにおいて配合および振動ローラが異なっても、圧縮強度 80 kg/cm² 以上、密度 2.3 t/m³ 程度得られている。また、 $G_{max}=150$ mm の配合においては振動ローラの機種が異なっても圧縮強度 80 kg/cm² 以上、密度 2.3 t/m³ 程度得られている。圧縮強度、密度とも D-15 配合よりも D-8 配合のほうが多少大きい傾向が見られた。したがって、層厚を 1 m、 $G_{max}=150$ mm と従来の RCD コンクリー

項目		配合			
		D-8	D-15		
小型 VC 値 (sec)		13.1 (7.7)	15.3 (6.0)		
空気量 (%)		1.7 (0.5)	2.0 (0.4)		
標準供試体	密度 (t/m ³)	2.33 (0.02)	2.31 (0.04)		
	圧縮強度 (kg/cm ²)	110 (10.2)	121 (17.1)		
コア供試体 (材令 91 日)	圧縮強度	層厚 100cm	ローラ 7 ton	91.8 (16.0)	82.6 (14.0)
		ローラ 11 ton	93.9 (10.5)	89.2 (14.9)	
	密度	層厚 100cm	ローラ 7 ton	2.36 (0.09)	2.30 (0.02)
		ローラ 11 ton	2.33 (0.03)	2.29 (0.02)	

(注) カッコ内は標準偏差

表-3 減勢工部試験結果

トより適用範囲を拡大しても、目標値を満足する結果が得られたと考えられる。

減勢工部の施工においては材料分離などを防ぐ工夫をし、コンシステンシーの経時変化を調べて、暑中では遅延型減水剤を通常使用量の2倍用いること、および撤出しから締固めまで1.5時間程度にすること等の対策を講じることにより上記の品質が得られたと考えられる。しかし、温度および締固めまでの時間等の影響が不明であり、これらの限界を把握する必要があった。この問題については§7.で述べる。

§ 6. RCD コンクリートの物性試験結果

6.1 水密性

(1) 試験方法

透水試験方法にはインプット法、アウトプット法などがあるが、本試験においてはアウトプット法を用いた。試験装置を図-4に示す。試験は、40 mm 以下のコンクリートを用いてφ15 × h 30 cm の円柱供試体の中央にφ19 mm の穴を設けた中空円筒形供試体を用い

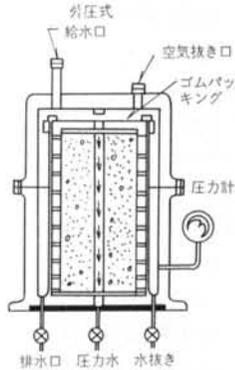


図-4 透水係数試験装置

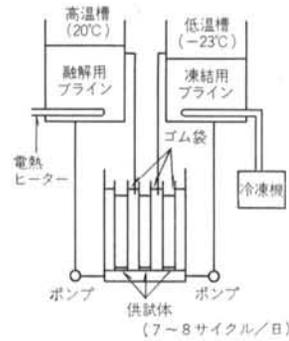


図-5 凍結融解試験装置

て行なった。供試体は新中野ダムで作製し、試験材令91日まで20°C水中養生を行ない試験に供した。試験は、パテントブルーで着色した圧力水を供試体中心孔より透水させ、透水量が一定になるまで測定を行なった。試験体の種類は、D-8配合 ($G_{max}=80$ mm) およびD-15配合 ($G_{max}=150$ mm) の2種類とした。

(2) 試験結果

透水係数は次式により算定した。

$$K = \frac{\rho \cdot \log e \frac{r_0}{r_i}}{2\pi h} \cdot \frac{Q}{P_i - P_0} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、K: 透水係数 (cm/sec)

P_i : 中空円筒形供試体の内側水圧 (kg/cm²)

P_0 : 中空円筒形供試体の外側水圧 (kg/cm²)

r_0 : 供試体の半径 (cm)

r_i : 中心孔の半径 (cm)

Q: 流出量 (cc/sec)

h: 供試体の高さ (cm)

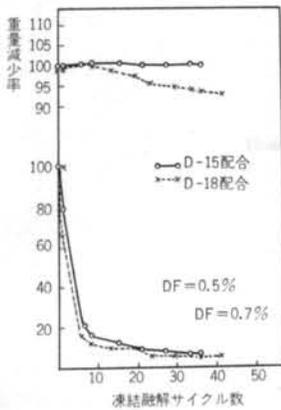
ρ : 水の単位重量 (kg/cm³)

透水試験結果は、D-8 配合で平均 17.5×10^{-9} cm/sec、D-15 配合で平均 7.43×10^{-9} cm/sec であり、D-8 配合はD-15 配合の約2倍である。RCD コンクリートの透水係数に関する報告は少ないが、水セメント比75~90%においては 10^{-9} cm/sec 程度の透水係数であるという報告¹⁰⁾があり、同程度の水密性を有していると判断される。RCD コンクリートは、我が国においては内部コンクリートとして用いられるため、透水係数が 10^{-9} cm/sec 程度であれば水密性において問題となることはないと思われる。

6.2 耐久性

(1) 試験方法

本試験においては ASTM C 666「急速凍結融解に対するコンクリートの抵抗試験方法」に準じて、最も苛酷



図一六 凍結融解試験結果

な気象条件を対象とする水中凍結融解法を採用した。凍結融解試験装置は、図一五に示すように供試体が所定の凍結融解サイクルを受けるに適切な試験槽、冷却・加熱装置および制御装置から成っている。凍結融解サイクルは2～4時間で最高4.4℃、最低-17.8℃の1サイクルを完了することを標準とした。

試験開始時の材令91日を標準として、たわみ1次振動数と重量を測定する。凍結融解は300サイクルまで、あるいは相対動弾性係数が60%に達するまで繰り返して行なった。試験体の種類は、D-8配合およびD-15配合の2種類とした。

(2)試験結果

相対動弾性係数および耐久性係数は式(2)、(3)により算定した。

$$P_c = \frac{n_1^2}{n^2} \times 100(\%) \quad \dots\dots(2)$$

ここで、

P_c : 凍結融解Cサイクルにおける相対動弾性係数

n : 試験開始時におけるたわみ1次振動数(サイクル/秒)

n_1 : 凍結融解Cサイクルにおけるたわみ1次振動数(サイクル/秒)

$$DF = \frac{P \cdot N}{M} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、

DF : 供試体の耐久性係数

P : 凍結融解Nサイクルにおける相対動弾性係数(%)

N : P の値が特定の値となるまでのサイクル数、あるいは試験を終了したときのサイクル数

M : 試験を終わらせる特定のサイクル数

重量減少率および相対動弾性係数の測定結果を図一六に示す。凍結融解の繰り返しに伴う重量減少率はD-15

配合	圧縮強度 σ_c (kg/cm ²)	引張強度 σ_t (kg/cm ²)	せん断強度 τ (kg/cm ²)	σ_t/σ_c	τ/σ_c	τ/σ_t
D-8	91.1	9.42	21.1	0.10	0.23	2.2
D-15	125	12.3	30.1	0.10	0.24	2.5

表一四 強度試験結果(材令91日)

配合では殆んど認められないが、D-8配合の場合には40回のサイクル数で約7%生じている。

相対動弾性係数は、凍結融解サイクル数35～40回で6%程度まで低下している。また、各配合の耐久性指数DFはD-15配合、D-8配合とも0.8%程度であった。通常のコンクリートの耐久性指数は、AEコンクリートで80%程度であることを考慮すると、RCDコンクリートの耐凍結融解抵抗性は大幅に低下していることが分かる。これは、RCDコンクリートの空気量が1～2%と小さく、また水セメント比が75～80%と大きいことによるものと考えられる。しかし、今後RCDコンクリートを外部コンクリートとしても適用することを考慮すると、耐凍結融解性を改善する方法を検討する必要があると思われる。

6.3 強度特性

(1)引張強度

引張強度試験用供試体は、40mmふるいでウェットスクリーンしたコンクリートを用いて製作した。JIS A 1113に準じて行なった試験結果を表一四に示す。引張強度は圧縮強度の1/10程度であり、一般のコンクリートと同程度であるといえる。

(2)せん断強度

せん断強度試験用供試体(15×15×53cm)は、40mm以下のコンクリートで製作し、2面せん断試験方法で行なった。試験結果を表一四に示す。せん断強度は圧縮強度の約1/4、引張強度の約2.3倍であった。

(3)圧縮強度試験

標準供試体およびコア供試体の圧縮強度と材令の関係を図一七に示す。材令と共に圧縮強度は増加しており、材令1年においても強度の増加が見られる。材令1年のコア供試体の圧縮強度は、材令91日のそれに比較して約50%の強度増加が見られ、材令91日の標準供試体の圧縮強度と同程度であった。また、D-8配合において単位水量と材令91日の圧縮強度および小型VC値との関係を図一八に示す。

最適水量は、D-8配合において95kg/m³であり、そのときのVC値は10～15秒である。単位水量がこれ以下になると、締固めが不十分になり強度が低下すると考えられ、また単位水量が大きくなると減少する結果が得ら

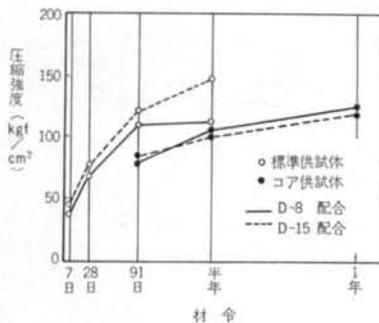


図-7 材令と圧縮強度の関係

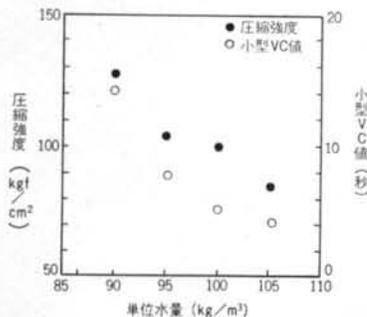


図-8 単位水量と圧縮強度、小型VC値の関係(材令91日)

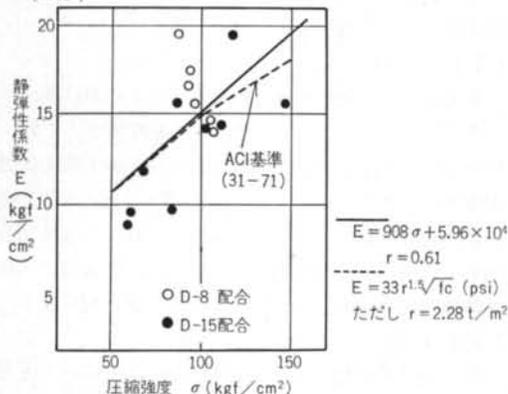


図-9 圧縮強度と静弾性係数との関係(材令91日)

れ、従来の関係が確かめられた。VC値が小さくなるにつれて圧縮強度は減少する傾向が得られ、両者の関係を把握しておくことによって、VC値から圧縮強度をある程度推定することができると思われる。

(4) 静弾性係数

材令91日におけるコア供試体の静弾性係数と圧縮強度との関係を図-9に示す。静弾性係数は $10 \sim 20 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ の範囲であった。また、静弾性係数は従来のコンクリートと同様に、圧縮強度に依存していることが分かる。

6.4 温度特性¹¹⁾

実験の種類	層厚 (m)	粗骨材の最大寸法 $G_{\max}(\text{mm})$	打設時初期温度 $T_p(\text{C})$	内部温度の最大値 $T_{\max}(\text{C})$	内部温度上昇量の最大値 $T_{r, \max} = T_{\max} - T_p(\text{C})$	
予備	G 8-1	1.0	80	3.5	15.3	11.6
	G 8-2	1.0	80	4.8	13.3	8.5
	G 8-3	1.0	80	6.4	16.9	10.5
	G 8-4	1.0	80	5.3	16.8	11.5
実	G15-1	1.0	150	7.5	16.2	8.7
	G15-2	1.0	150	10.0	18.0	8.0
	G15-3	1.0	150	9.5	16.0	6.5
	G15-4	1.0	150	8.0	16.1	8.1
験	P-1	0.75	80	6.4	15.6	9.2
	P-2	0.35	80	6.4	11.2	4.8
	L-100	1.0	150	22.0	33.0	11.0
	L-150	1.5	150	23.0	34.8	11.8
本施工	1.0	150	21.0	29.9	8.9	
	0.7	150	17.8	24.0	6.2	

表-5 コンクリート温度測定結果

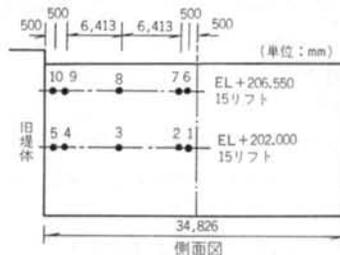


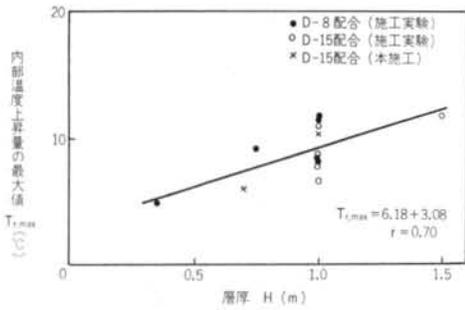
図-10 コンクリート温度測定箇所

(1) 測定概要

新中野ダム減勢工部の本施工に先立って行なった施工実験、および本施工で測定を実施した。コンクリート温度の検出にはc-c熱電対(銅-コンスタンタン、 $\phi 0.65 \text{ mm}$ 、ビニール被覆)を使用した。実験に使用したコンクリート配合は、D-8配合およびD-15配合の2種類である。施工実験における層厚は0.35、0.75、1.0および1.5mの4水準である。本施工においては層厚0.7および1.0mの2種類であり、第10リフトおよび第15リフトにおいてそれぞれ5箇所測定を行なった。コンクリート温度測定位置を図-10に示す。

(2) 測定結果

予備実験および本施工における測定結果を表-5に示す。層厚と内部温度上昇量の最大値($T_{r, \max}$)との関係を図-11に示す。両者の関係は $T_{r, \max} = 6.18H + 3.08$ ($r = 0.70$)で近似され、層厚が厚くなると $T_{r, \max}$ は



図—11 層厚と内部温度上昇量の最大値との関係

大きくなり、層厚 1.5m で 12℃ 程度の上昇量である。

層厚 1 m の条件で、D-8 配合と D-15 配合において $T_{r, \max}$ の平均値の差の検定を行なうと、両者に有意差があるとはいえず、今回得られたデータの範囲では配合による影響は見られないと考えられる。RCD コンクリートのセメントの水和による温度上昇量は層厚 1 m で 10℃ 程度であり、温度的には温度ひびわれを制御するために有効なコンクリートであると思われる。また、コンクリートの温度の経時変化は、打込み後表—5 に示したような温度上昇を示した後、後のリフトの温度の影響を受けて再上昇するが、その後はゆるやかに降下の傾向を示している。しかし、その降下の割合は比較的小さく、打設後 18 ヶ月経過時点における減勢工内部のコンクリート温度は 18℃ 程度である。

このように、セメントの水和熱による温度上昇は小さいが、打込み温度が高い場合には内部温度の最大値は比較的高くなる。このことから、パイプクーリングを使用しないで RCD コンクリートをダムコンクリートとして採用する場合には、温度ひびわれを制御するためにプレクーリング等の対策が必要になる場合も起こり得ると思われる。

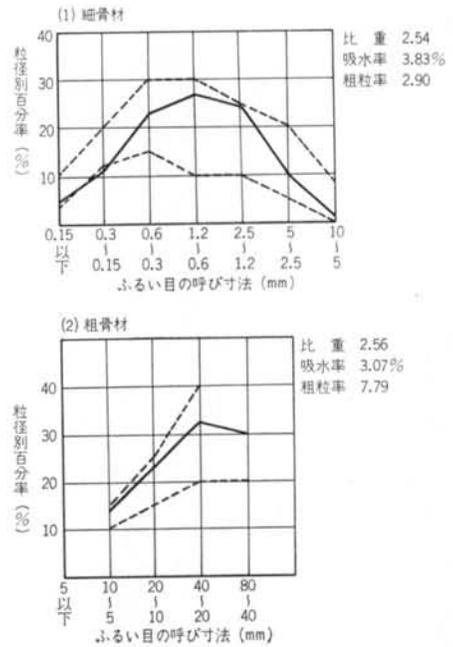
§ 7. 温度および時間が締固め性状に及ぼす影響

7.1 実験概要

RCD コンクリートを施工する上で避けられない要因であるコンクリート温度、および締固め開始までの時間

粗最大材寸の法	W/C+F (%)	F/C+F (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
				w	C	F	C+F	S	G	混和剤
80	83	30	34	100	84	36	120	723	1415	0.3

表—6 配合



図—12 骨材の試験成績

に着目し、これらの要因が RCD コンクリートの品質、そして締固め性状に及ぼす影響について検討して、§ 5. で必要となった項目を明らかにした。

7.1.1 使用材料

本実験では、新中野ダム減勢工部施工におけるデータとの比較を行なうことを考慮して、新中野ダムと同一の材料を用いた。セメントは日本セメント(株)磯工場製の中庸熟フライアッシュセメント ($F/C+F=30\%$) を用い、混和剤は日曹マスタービルダーズ製遅延型減水剤を $(C+F) \times 0.25\%$ 用いた。細骨材、粗骨材はそれぞれ砕砂、碎石であり、その試験成績を図—12 に示す。

7.1.2 配合

新中野ダムにおける D-8 配合 ($G_{\max}=80$ mm) を基本として、傾胴式ミキサ (0.2 m³) の練り混ぜ性能および練り上り直後の VC 値を考慮して、単位水量を 5 kg/m³ 増して 100 kg/m³ とした。配合を表—6 に示す。

7.1.3 実験の種類

(1) VC 値の経時変化測定実験

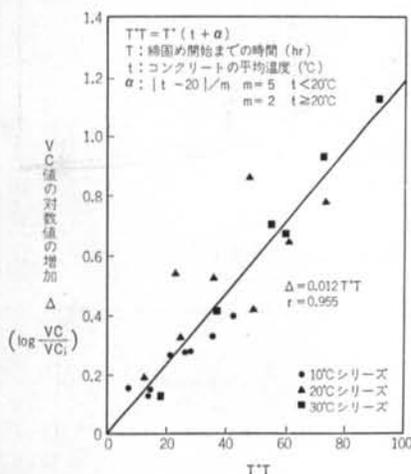
40 mm 以下のコンクリートを用いて 小型 VC 試験を行

要 因	水 準
コンクリート温度 (°C)	10, 20, 30,
締固め開始までの時間(分)	0, 60, 120,

表—7 要因と水準

要因	水準
コンクリート温度 (°C)	10, 20, 30
締固め開始までの時間(分)	0, 30, 60, 90, 120, 150

表一八 要因と水準



図一三 Δ と $T^\circ T$ の関係

ない、小型 VC 値の経時変化を測定した。要因と水準を表一七に示す。

(2) 締固め性状確認実験

フルサイズ ($G_{max}=80$ mm) のコンクリートを用いて大型 VC 試験を行ない、大型 VC 値および沈下量を測定した。また、試験終了後の大型供試体 ($\phi 48 \times h$ 約 35 cm) を $\phi 180$ mm でコアボーリングを行ない、材令 91 日で密度、圧縮強度を試験した。要因と水準を表一八に示す。両実験とも、所定の温度になるように練り上げたコンクリートを、試験時間まで各温度条件の室内に放置した。

7.2 実験結果

7.2.1 VC 値の経時変化

コンクリートの初期材令における圧縮強度、引張強度等を推定する方法として、温度と時間の積 (Maturity) を用いた $T^\circ T$ 方式が提案されている¹³⁾。この考えを導入し、VC 値の対数値の増加 $\Delta (\Delta = \log(VC/VC_i))$ 、VC: 練り上がり直後の VC 値) と $T^\circ T$ の関係を図一三に示す。この結果から、 Δ と $T^\circ T$ の関係は直線で近似され次式で示されることが明らかとなり、 Δ は一定の温度条件下では締固め開始までの時間と直線関係になることが確認された。

$$\Delta = 0.012 T^\circ T, r = 0.955$$

温度シリーズ (°C)	時間 (分)	大型 VC 値 T(sec)	沈下率曲線 $y = \frac{t}{at+b}$	最終沈下率 y_t	極限沈下率 y_∞	y_t/y_∞
10	0	61	$y = \frac{t}{0.0491t + 0.491}$	17.5	20.4	0.86
	60	70	$y = \frac{t}{0.0449t + 0.450}$	19.5	22.3	0.87
	120	243	$y = \frac{t}{0.0487t + 0.806}$	19.2	20.5	0.94
20	0	33	$y = \frac{t}{0.0545t + 0.456}$	14.6	18.3	0.80
	60	167	$y = \frac{t}{0.0607t + 0.581}$	15.6	16.5	0.95
	120	261	$y = \frac{t}{0.0539t + 0.943}$	17.4	18.5	0.94
30	0	76	$y = \frac{t}{0.0581t + 0.449}$	15.6	17.2	0.91
	60	245	$y = \frac{t}{0.0570t + 0.512}$	16.9	17.5	0.97
	120	493	$y = \frac{t}{0.0634t + 0.813}$	15.4	15.8	0.97

表一九 大型 VC 試験時の沈下率曲線

ここで、 $\Delta = \log \frac{VC}{VC_i}$

$$T^\circ T = T^\circ (t + \alpha)$$

T: 締固め開始までの時間 (hr)

t: コンクリートの平均温度 (°C)

$$\alpha = |t - 20|/m \quad m = 5 \quad t < 20^\circ\text{C}$$

$$m = 2 \quad t \geq 20^\circ\text{C}$$

したがって、コンクリート温度が 10~30°C という実用的な範囲内においては、任意の温度、任意の締固め開始までの時間における VC 値を推定することができると考えられる。

7.2.2 締固め性状

(1) 沈下性状

大型 VC 値において、沈下率 (y) と振動時間 (t) の関係は双曲線 $y = t/(a+bt)$ で近似されることが分かり、その結果を表一九に示す。 y_t は大型 VC 値における沈下率で最終沈下率と呼び、 y_∞ は振動時間 $t \rightarrow \infty$ としたときの算定沈下率で極限沈下率と呼ぶ。これらの結果について分散分析を行なうと、特性値最終沈下率 y_t においてはコンクリート温度が有意要因となり、コンクリート温度が低いほうが締固め程度が良いといえる。また、特性値を最終沈下率を極限沈下率で除した値 y_t/y_∞ とした場合は、両要因とも有意要因とならないことが分かり、 y_t/y_∞ はコンクリート温度および締固め開始までの時間に影響を受けないパラメータであると考えられる。

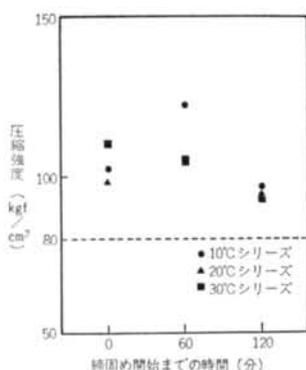


図-14 圧縮強度と締固め開始までの時間の関係

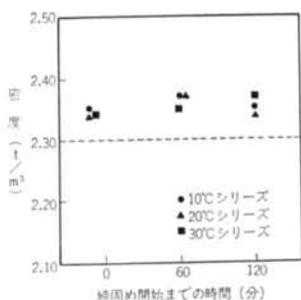


図-15 密度と締固め開始までの時間の関係

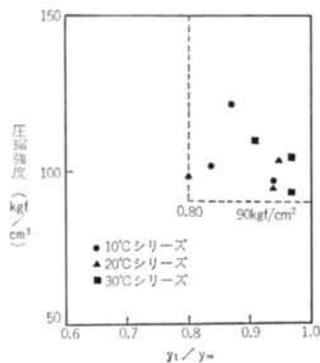


図-16 圧縮強度と y_1/y_∞ の関係

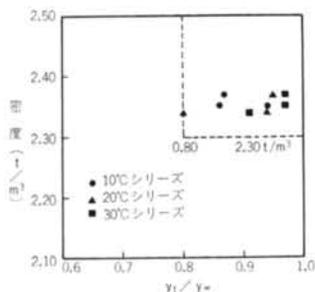


図-17 密度と y_1/y_∞ の関係

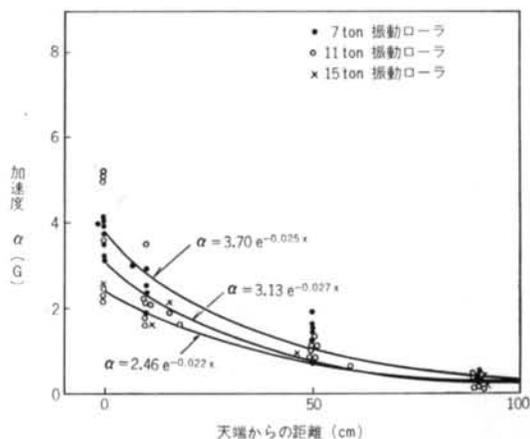


図-18 加速度分布 (層厚 1 m の場合)

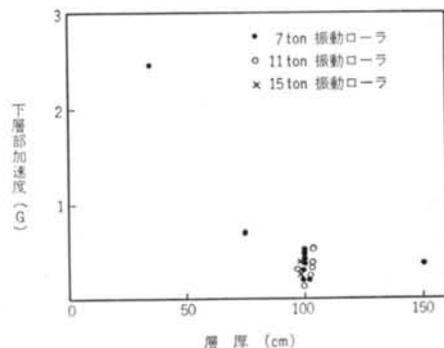


図-19 下層部の加速度と層厚の関係

(2) 圧縮強度および密度

材令91日におけるコア供試体の圧縮強度および密度と締固め開始までの時間の関係を、各温度シリーズごとに図-14, 15に示す。分散分析を行なうと、圧縮強度について締固め開始までの時間が高度に有意な要因であることが分かった。しかし、きびしい条件である水準120分における圧縮強度の要因効果の推定を行なうと、 $94.9 \pm 6.4 \text{ kg/cm}^2$ となり、目標値 80 kg/cm^2 を満足している。また、密度においては有意な要因は見られなかったが、実験範囲内では密度 2.3 t/m^3 を満足していた。したがって、締固めまで120分程度経過しても、十分に締固めを行なうことによって満足する品質のコンクリートが得られることが明らかになった。

次に、沈下率比 y_1/y_∞ とコア供試体の圧縮強度、密度との関係を図-16, 17に示す。この結果から、 y_1/y_∞ が0.80程度以上であると、本実験の範囲においては密度 2.3 t/m^3 、圧縮強度 80 kg/cm^2 を満足するコンクリートが得られることが明らかになった。

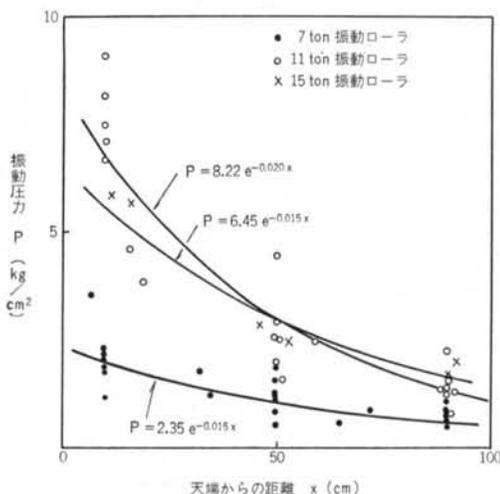


図-20 振動圧力分布 (厚層 1 m の場合)

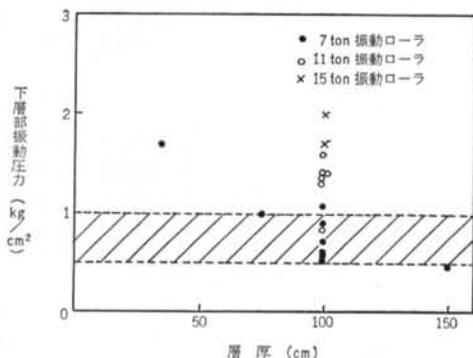


図-21 下層部の振動圧力と層厚の関係

§ 8. 振動締固め特性

8.1 振動伝ば性状

8.1.1 加速度分布性状

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、土圧計を埋設して振動締固めの際に生ずる加速度、振動圧力を測定した。コンクリート中に埋設した加速度計、土圧計は天端から約 10 cm (上層部)、中央部、および底から約 10 cm 下 (下層部) の位置である。

図-18には、減勢工部および施工実験で得られた加速度の分布を示し、図-19にはコンクリート下層部に伝ばした加速度と層厚の関係を示した。加速度は全転圧回数平均である。図-18において、11 ton 振動ローラの振動輪加速度にばらつきが見られるが、これは施工時に振動数が一定でなかったため生じたものと考えられる。

加速度は振動輪から離れるに従い減衰するが、その関

係は $\alpha = ae^{-bx}$ で近似されることが明らかになった。層厚 1 m においては、振動輪の加速度の 4~14%程度が下層部に伝ばしている。

図-19から、層厚が大きくなると下層部に伝ばする加速度は指数関数的に減少することが明らかになった。また、加速度の伝ば式は振動ローラにおいて多少異なるが、その減衰性状は伝ば式 $\alpha = ae^{-bx}$ の b を比較すると $-0.022 \sim -0.027$ であることが分かる。層厚 1 m においては、振動ローラの種類によらず 0.2~0.5G の加速度が下層部に伝ばしている。

8.1.2 振動圧力分布性状

図-20には、減勢工部および予備実験で得られた振動圧力の分布を示し、図-21にはコンクリートの下層部に伝ばした振動圧力と層厚の関係を示した。振動圧力は全転圧回数の平均である。

コンクリート中に伝ばする振動圧力は振動源から離れるに従い減衰するが、その関係は $P = ae^{-bx}$ で近似され、加速度と同じ式で振動圧力の減衰性状が表わされることが明らかになった。振動圧力の伝ば式は振動ローラの種類によって異なるが、その減衰性状は上式の指数項 b を比較すると $-0.015 \sim -0.020$ であり、加速度よりもその減衰が小さいことが分かった。

図-21の斜線部は、Forssblad が振動締固めに有効な振動圧力として示した値約 $0.5 \sim 1.0 \text{ kg/cm}^2$ ($0.05 \sim 0.1 \text{ MPa}$) である¹⁴⁾。同一振動ローラを用いた場合、層厚が大きくなるほど振動圧力は指数関数的に小さくなり、下層部まで伝ばしにくくなることが分かる。また、層厚 1 m において下層部に伝ばする振動圧力は、振動ローラ 7 ton, 11 ton, 15 ton においてそれぞれ平均で 0.5, 1.3, 2 kg/cm^2 であるために、これらの振動ローラは振動締固めに有効な圧力を伝ばする能力を持つと考えられる。

8.1.3 締固め性状

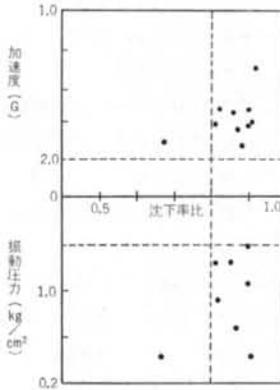
減勢工部の施工において、コンクリート中の振動圧力および加速度を測定した打設層 1 m のコンクリートの品質は、材令 91 日のコア供試体で圧縮強度 $85 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$ 、密度 $2.25 \sim 2.36 \text{ t/m}^3$ であり、所要の品質を有していると判断される。したがって、層厚 1 m においてはコンクリートの下層部に 0.5 kg/cm^2 程度以上の振動圧力、0.2G 程度以上の加速度が繰り返し加わることによって RCD コンクリートは十分に締固められるものと考えられる。この結果は施工実験のデータとほぼ同様であった⁷⁾。

8.2 沈下性状

振動ローラによる締固めによって生じた表面部の沈下量を、締固め前の層厚で除した沈下率で表わす。この沈

G_{max} (mm)	層厚 (cm)	振動ローラ (ton)	圧転回数 N (回)	沈下率曲線	最終沈下率 y_N (%)	極限沈下率 y_{∞} (%)	y_N/y_{∞}
150	70	7	40	$y = \frac{N}{0.216N+1.300}$	4.02	4.63	0.87
150	70	11	16	$y = \frac{N}{0.107N+0.987}$	5.93	9.35	0.63
150	70	11	16	$y = \frac{N}{0.117N+0.553}$	6.60	8.55	0.77
150	100	11	16	$y = \frac{N}{0.219N+1.694}$	3.68	4.57	0.67
150	100	11	16	$y = \frac{N}{0.239N+1.067}$	3.27	4.18	0.78
80	100	7	32	$y = \frac{N}{0.113N+0.848}$	7.18	8.85	0.81
80	100	11	12	$y = \frac{N}{0.375N+0.557}$	2.37	2.67	0.89
平均							0.77
標準偏差							0.08

表—10 沈下率曲線



図—22 沈下率比と加速度、振動圧力の関係

下率と締固め回数との関係は、双曲線 $y=N/(a+bN)$ で近似されることは著者が既に示した⁷⁾。

減勢工部において測定した結果を表—10に示す。この結果から、振動ローラが大型になると沈下率比 y_N/y_{∞} が小さくなる傾向が見られ、0.63程度のもも得られているが、平均すると0.77であった。また、測定した沈下率には各試験時において7~30%程度のばらつきが見られた。沈下率測定位置とコアボーリング位置はかならずしも一致していないが、沈下率を測定した打設層のコンクリートの平均的品質は圧縮強度 86 kg/cm^2 程度、密度 2.27 t/m^3 程度であった。

振動ローラを用いて締固めた場合の沈下率曲線は双曲線 $y=N/(a+bN)$ で近似されるが、大型 VC 試験の際の

表面沈下率曲線も同じ式で表わされることが §7. で示された。したがって、振動ローラおよび大型 VC 試験機の両者では、締固める方法は異なるけれども沈下性状は同じ傾向を示すと考えられる。また、沈下率比と品質を比較すると、両者とも0.8程度以上あれば良い品質のコンクリートが得られると考えられる。

今回の結果では、沈下率比が0.8程度以下でも所要の品質を満足しているが、施工実験および室内実験の結果を検討すると沈下率比0.8程度以上必要であると考えられる。また、沈下率比と加速度および振動圧力との関係を図—22に示す。離れている点は減勢工部で得られたデータであり、その他は施工実験のデータであるが下層部に加速度 $0.2G$ 程度以上、振動圧力 0.5 kg/cm^2 程度以上が繰り返し作用することによって、大部分が沈下率比0.8程度を満たしている。したがって、硬化後のコンクリートの品質を確保するためには、締固め終了後の沈下率比が0.8程度以上となるように管理することが必要であると考えられる。

§ 9. まとめ

新中野ダム減勢工部に約 $13,000 \text{ m}^3$ の RCD コンクリートを打設した結果、および室内実験結果をまとめると以下のようなものである。

- (1) $G_{max}=150 \text{ mm}$, 層厚 1 m という従来よりきびしい施

工条件においては材料分離を防ぐことが重要であり、そのためにホイールローダを採用し、さらに転圧までの時間を1.5時間以内に管理することによって目標値を満足するRCDコンクリートを施工できることが示された。

(2)RCDコンクリートのコンシステンシーと、施工上重要である温度および転圧までの時間との関係は、Maturityを用いて直線関係が成り立つことが確認された。この関係から、実用的な範囲においては施工条件および温度条件が変化したときのコンシステンシーを推定できると考えられる。また、コンクリート温度30℃で締固めまでの時間が2時間という条件においても所要の品質が得られていることから、施工の際には $T^{\circ}T=70$ 程度が一つの限界になると考えられる。

(3)表面振動によって生ずる加速度および振動圧力は、RCDコンクリート中では $y=ae^{-bx}$ に従って減衰することが明らかとなり、コンクリートのVC値8~15秒、転圧までの時間1.5時間程度においては0.2G程度以上の加速度、0.5 kg/cm²程度以上の振動圧力が作用していることが分かった。また、振動ローラの性能から、上式を用いてコンクリート内部に伝ばする加速度、振動圧力がある程度推定できると考えられる。

(4)振動ローラの沈下性状は双曲線で近似されることが明らかとなり、本結果の範囲においては沈下率比0.8程度以上であれば目標値を満たす品質が得られると考えられる。また、大型VC試験における沈下性状は、振動ローラのそれと同様であることが明らかとなり、締固め性状を大型VC試験機を用いて室内で検討する方法が

示された。

(5)RCDコンクリートの締固め性状から、所要の性能を有する振動ローラを用いて十分に締固めを行ない、沈下率比が0.8程度以上となるように管理することによって目標品質を満足すると考えられる。

(6)RCDコンクリートの透水係数は10⁻⁹cm/sec程度であり、十分な水密性を有していると思われる。耐凍結融解性は一般のダムコンクリートより大幅に低下していることが明らかになった。また、RCDコンクリートの内部温度上昇量は小さく、セメント量を一般のダムコンクリートより40 kg/m³程度少なくしたことによる効果であると思われる。したがって、設計的にはRCDコンクリートを内部コンクリートとして用いていることは妥当であると考えられる。

今回の結果から、RCDコンクリートの特性をある程度把握できたと考えられ、これらの成果を施工計画等に反映できるものと考えられる。

今後の課題としては、振動締固めに有効な加速度、振動圧力の限界値およびその寄与率等を明らかにすること、またさらに経済性を追求するために産業副産物を利用すること、およびフライアッシュ等の混入率を増加した場合の特性についてとらえることが挙げられる。

本実験を行なうに当りご指導いただいた北海道土木現業所新中野ダム建設事務所の皆様、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) 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年)
- 2) 鈴木、坂田：“RCDコンクリート諸問題—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.339 (1980年)
- 3) 韓国土開発技術研究センター：“RCD工法技術指針(案)” (1981年)
- 4) 下村、柳川：“玉川ダムにおけるRCD工法の試験施工について”ダム技術 Vol.1, No.2 (1983年)
- 5) 廣瀬、竹林：“コンクリートダムの合理化施工の現況と課題”コンクリート工学 Vol.20, No.8 (1982年)
- 6) ACI: The Annual Convention, Los Angeles, 1983.
- 7) 奥村他：“粗骨材の最大寸法150mmを用いたRCDコンクリートの施工方法の開発研究”清水建設研究所報 第36号 (昭和57年10月)
- 8) 韓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年)
- 9) 村田二郎：“コンクリートの水密性の研究”土木学会論文報告集 第77号 (1966年)
- 10) 田村、米倉、野田：“RCD工法の開発 (基礎実験および屋外実験報告)”三井建設技術研究所報 No.5 (1981年)
- 11) 小野、南、嶋田：“貧配合マスコンクリート (RCDコンクリート) の温度特性に関する一考察”土木学会第37回年次学術講演会講演概要集第5部 (1982年)
- 12) 栗田、奥村、根上：“RCDコンクリートの振動締固め性状に関する一研究”土木学会第37回年次学術講演会講演概要集第

5部(1982年)

- 13) 野中, 奥村: “コンクリートの初期性状に関する研究(その3)” 清水建設研究所報 第29号(1978年)
- 14) Lars Forssblad: “Betongvibrensens Reologi och Mekanism” Nordisk Betong (Apr. 1978)