

RCD 工法と RCC 工法との特性について

CHARACTERISTICS OF THE RCD CONSTRUCTION METHOD AND THE RCC CONSTRUCTION METHOD

鈴木德行*・志水茂明**

By Noriyuki SUZUKI and Shigeaki SHIMIZU

In recent years, the RCD construction method has become popular as a new concrete dam construction method in which superstiff-consistency lean concrete is compacted with vibrating rollers. It is an epoch-making, economical and safe method originally-developed in Japan. Dams of the same quality can be constructed in a shorter period by this method than by conventional methods. In the United States, a construction method similar to RCD has been developed in which superstiff-consistency lean concrete is also compacted with vibrating rollers. It is, however, basically very different from the RCD construction method in its design engineering and construction work, and is called the RCC construction method. The following text compares the RCD and the RCC construction methods and discusses the prospects of the RCD construction method optimization.

Keywords: roller compacted dam-concrete method

1. ま え が き

コンクリートダムの合理的な施工法は1973年に開催された第11回国際大ダム会議において、「コンクリートダムの工期の短縮および経済的建設」についての新しい提案がなされ、以来、合理化を図ろうとする気運が世界的に高まった。このような動きの中で日本では昭和49年からコンクリートダムにおける工期の短縮および経済的建設等の検討を目的とした「コンクリートダム合理化施工に関する研究」が建設省により進められ、フィルダムの施工技術を導入した新工法であるRCD (Roller Compacted Dam-Concrete) 工法が開発された。この工法は、貧配合で超硬練りコンクリートをインクライン、ダンプトラック等で運搬し、ブルドーザで敷き均し、振動目地切り機によって横継目の造成を行い、振動ローラで締め固める方法でコンクリートダムを施工する工法である¹⁾。すでにRCD工法によって建設されたダムは5か所、建設中のダムは10か所で、今後、ますます普及するものと考えられる。

一方、アメリカでも、フィルダムの施工技術を導入した新しいRCC (Roller Compacted Concrete) 工法を開発し、すでに10か所のダムが、この工法によって建設されている。RCC工法も、RCD工法と同様に、貧配合で超硬練りコンクリートをダンプトラック、ベルトコンベヤ等で運搬し、ブルドーザ、フィニッシャー等で敷き均し、振動ローラで締め固める工法でRCD工法に近い工法である。

しかし、RCD工法とRCC工法とでは、同様の工法にみえるが、設計、施工の基本的な点で大きな差がある。それは、RCD工法では、従来のコンクリートダムと同等の品質を得ることを基本としているのに対して、RCC工法では、ソイルセメント的な配合で、横継目を基本的には設けないなど、よりフィルダムに近い施工法を採用し、施工速度の向上を図り、コンクリートの品質より、建設コストの低下を基本にしていることである。このため、RCC工法の施工速度はRCD工法に比較して格段に速いが、コンクリート品質はかなり違ったものとなっている^{2),3)}。

本文では、RCD工法とRCC工法との特性について明らかにし、この特性について比較検討を行うとともに、合理化施工の今後のあるべき方向について論ずるものである。

* 正会員 工博 名城大学教授 理工学部土木工学科
(〒468 名古屋市天白区塩釜口1-501)

** 正会員 建設省関東地方建設局長
(〒100 千代田区大手町1-3-1 大手町合同庁舎)

2. RCD 工法の特長

RCD 工法は、フィルダム施工の最大利点である汎用性のある土工機械の活用により、コンクリートの運搬、打設手段の改善を図った工法で、使用するコンクリートも RCD 工法に適するように超硬練り貧配合のコンクリートとしている。

この工法は急速施工によるダムの建設工期の短縮を可能にし、経済性を高め、ダム地点の地形、地質の幅広い条件の変化にも対応でき、また施工時の安全性の面でも優れ、環境保全対策にも資するものである。具体的には、コンクリートの運搬打設の合理化を主として行い、ダンプトラック等でコンクリートを運搬し、ブルドーザで敷き均し、振動目地切り機で横継目を造成し、振動ローラで締め固める工法である。従来のブロック打設工法に比べ、横継目型枠を設けず堤体全面をレヤーで打設するため、広い平面での作業となりコンクリートの運搬、打設能力を高めるとともに安全性の面でも優れた工法である^{4)~6)} (写真—1 参照)。

このような RCD 工法によるダム本体の施工としては、大川ダム基礎部の施工に続き島地川ダムで初めて適用され、一応の成果を納め、引き続き研究開発が行われ建設も進められている (表—1 参照)。次に、RCD 工法の特長について述べる。



写真—1 RCD 工法による島地川ダムの施工状況

(1) 設 計

RCD 工法の設計に対する基本的な思想は、従来のコンクリート重力ダムと同様の水密性と耐久性を確保することにある。このようなことから RCD 用コンクリートの品質は、従来のコンクリートと同程度の水密性が要求され、また耐久性については、上流側 2.5~3.0 m、下流側 2.0~3.0 m について従来のコンクリートダムと同様に外部コンクリートを施工している。横継目からの止水についても、従来と同様にステンレス、銅板、塩化ビ

表—1 日本における RCD 施工ダム

ダム名	都道府県	堤高 (m)	堤頂長 (m)	堤体積 (m ³)	新施工法
島地川ダム	山口	90.0	257.0	324 000	本体：RCD、固定ケーブル+ダンプS58
大川ダム	福島	75.0	406.5	1 000 000	ダム基礎部：RCD、ダンプS54
新中野ダム	北海道	74.9	248.0	嵩上げ部 201 000	減勢工：RCD、ダンプS55
阿木川ダム	岐阜	102.0	430.0	5 400 000	仮締切り：RCD、ダンプS58
玉川ダム	秋田	100.0	441.5	1 140 000	本体：RCD、インクラ+ダンプS58
美利河ダム	北海道	40.0	910.0	コ 860 000 ロ 200 000	本体：RCD、ダンプS59
奥野ダム	福島	69.0	289.0	212 000	本体：RCD、インクラ+ダンプS60
白水川ダム	山形	54.5	367.0	312 000	本体：RCD、ダンプS61
朝日小川ダム	富山	84.0	260.0	350 000	本体：RCD、ダンプS61
塊川ダム	富山	115.0	297.5	626 000	本体：RCD、インクラ+ダンプ
朝里ダム	北海道	73.9	390.0	484 000	本体：RCD、ダンプ
道平川ダム	群馬	70.0	300.0	374 000	本体：RCD、インクラ+ダンプ
月山ダム	山形	125.0	488.0	1 295 000	本体：RCC工法
神室ダム	山形	60.6	257.0	298 000	本体：RCD工法
小玉ダム	福島	102.0	315.0	662 000	本体：RCD工法

ニール板等、安全を考慮して二重に設置している。

(2) コンクリート配合

コンクリート上を重機械が走行するため、そのトラフィカビリティを確保し、温度応力を小さくおさえるためフライアッシュを混入し、セメント量を非常に少なくした貧配合、超硬練りとしている。一般に、セメント+フライアッシュ=120~130 kg/m³でフライアッシュの混入率は20~30%である。骨材に占める砂の比率 S/A は30~34%で、従来のダムコンクリートより砂の比率が多く締め固めやすくしている。また、骨材の最大粒径は、骨材の分離を考慮して一般的には80 mmと従来のダムコンクリートに多くみられる150 mmに比べて小さくしている。しかしながら、玉川ダムのように150 mmとして好結果を得ている事例もある。また、細骨材に占める微粒分の混入率が施工性、強度に大きく影響することが明らかにされている。川砂、砕砂によってわずかに異なるが、0.15 mm以下の微粒分の混入率が使用する砂に対して10%程度の場合が振動ローラで締め固めやすく、多くの場合、コンクリート強度にも好結果をもたらすことがわかっている。

また、コンクリート上を重機械が走行できるように硬練りであることと同時に、締め固めが可能であれば単位水量は少ないほど強度が大きくなる。そこで、島地川ダムでは、締め固めが最適な VC 値 (RCD 用コンクリートのコンシステンシーを示す値で、RCD 用振動台式コンシステンシー試験方法によって得られる値を砂で表わしたものをいう) を現場の施工から図—1 に示すように20秒とし、単位水量を105 kg/m³としている。この単位水量は図—2 からみられるように強度が最も大きくなる値に近いものとなっている^{7)~10)}。また、RCD 用コンクリートの配合例は表—2 のようである。

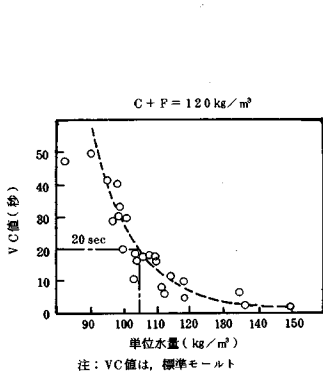


図-1 単位水量と VC 値

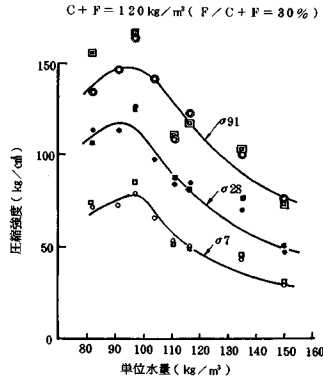


図-2 単位水量と圧縮強度

表-2 RCD コンクリート配合

ダム名	Gmax (mm)	C (kg)	F (kg)	C+F (kg)	W (kg)
島地川ダム (1980)	80	84	86	120	105
大川ダム (マット部 1980)	80	96	24	120	102
玉川ダム (1983 開始)	150	91	39	130	95
美利河ダム (1984 開始)	80	84	36	120	90
真野ダム (1985 開始)	80	96	24	120	102

注: Gmax=骨材の最大寸法、C=セメント、F=フライアッシュ、W=水

島地川ダムでは1リフトの上部の強度が小さく、下部の強度が大きい、いわゆる上弱下強の問題があった。これに対して玉川ダムでは単位水量 (VC 値) と上弱下強の問題について究明した結果、図-3 に示すように、単位水量 100 kg/m³、VC 値 15 秒の場合に上下の強度がほぼ同じとなり、これより単位水量が減少すると、上強下弱となり、単位水量が増加すると、上弱下強となることを明らかにしている^{11), 12)}。

(3) コンクリートの運搬方式

RCD 工法の大きな要素であるコンクリートの運搬方式

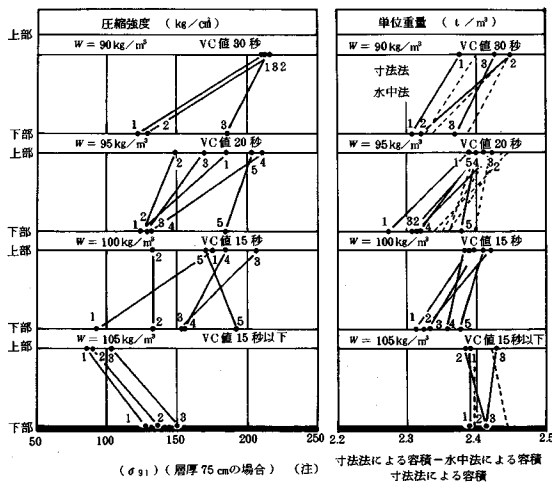


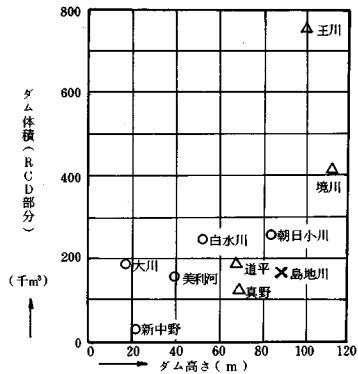
図-3 同一リフト内の上部・下部の品質の差⁹⁾

式は、地形、地質、ダム規模によって適切に決定することが必要である。RCD 工法による運搬方式は、ダンプトラック直送、インクライン+ダンプトラック、固定ケーブルクレーン+ダンプトラック等の方式がとられている (表-3 参照)。

これらの運搬方式と、ダム高、ダム本体体積の関係を図-4 に示したが、この図からも明らかのように、ダム高が低く、運搬路が容易に付けられる場合にはダンプトラック直送が適している。ダム高が高く、斜面が急な場合にはインクライン+ダンプトラックが多く用いられている。また、ダムサイトが急斜面のV字形で、ダム高も比較的高い場合には固定ケーブルクレーン+ダンプトラックの組合せが適している。このように、ダム高、ダムサイトの地形等によって運搬方式を決定している¹³⁾⁻¹⁵⁾。

表-3 運搬方法

運搬方法	堤体まで	堤体上
島地川ダム	固定ケーブルクレーン	ダンプトラック
大川ダム	ダンプトラック	ダンプトラック (直送)
玉川ダム	インクライン	ダンプトラック
美利河ダム	ダンプトラック	ダンプトラック (直送)
真野ダム	インクライン	ダンプトラック
白水川ダム	ダンプトラック	ダンプトラック (直送)
朝日小川ダム	ダンプトラック	ダンプトラック (直送)
壱川ダム	インクライン	ダンプトラック



注: ○ダンプトラック、△インクライン+ダンプトラック
×固定ケーブルクレーン+ダンプトラック

図-4 運搬方式とダム高、体積の関係

(4) コンクリートの敷均し

RCD コンクリートは、ダンプトラックに積み降しなど運搬の過程で骨材の分離が起こるので、コンクリート敷均しの施工時に骨材分離が生じないように敷き均すことが重要である。このことは大川ダムの試験施工においても指摘されており、これらのデータを基本とし、これらを発展させ島地川ダムでは幾多の試験施工を行い骨材

分離が防止できる薄層まき出し方式を開発した。

この方式は、コンクリートを薄く放射状に広く敷き均すことによって骨材分離防止を図るもので、50 cm リフトでは2~3層、75 cm リフトでは3~4層、100 cm リフトでは4層程度にまき出している。現在までに施工したダムは、すべてこの薄層まき出し方式によって施工し、良好な結果を得ている^{16),17)}。

(5) 横継目の造成

一般に重力式コンクリートダムは、クラック防止のため15 m 間隔に横継目を造成している。RCD 工法では全面レヤーであるため、横継目の施工はコンクリート敷均し後、振動目地切り機によって亜鉛引き鉄板をコンクリート内に挿入し横継目を造成している。各ダムの目地切り機は、目地切り板が1~2 m でバックホウを改良したものが大部分である。目地切りは、コンクリート練りませ後3時間程度まで可能である。

(6) コンクリートの締固め

コンクリートの締固めは大部分のダムがボマークの7 t 振動ローラによって締固めを行っている。締固め回数はリフト高50 cm で6回、70~100 cm で12回程度である。締固め回数はこれ以上増加してもコンクリートの強度、密度が増加しない。また、締固めはコンクリート練りませ後、前レーンとの接合部の締固めが夏期は3時間程度、他の期間は4時間程度以内に行うことが必要である。

締固めリフト高は50 cm、75 cm、100 cm について施工されているが、最近では75 cm の施工が多くなっている(表-4 参照)。

表-4 締固め方法

ダム名	締固め機械	リフト高	回数	打設速さ
島地川ダム	ボマーク BW200	70 cm	12 回	3~4 日に1リフト
大川ダム	〃	50 cm	6 回	2~3 日に1リフト
玉川ダム	〃	75・100 cm	12 回	3~5 日に1リフト
美利河ダム	〃	70 cm	12 回	3~4 日に1リフト
真野ダム	〃	50 cm	6 回	2~3 日に1リフト

(7) グリーンカット

RCD 工法ではリフト高が従来の1.5~2.0 m に対し0.5~1.0 m であり、グリーンカットの面積は従来の工法に対して増加している。このためグリーンカットの合理化が必要であり、種々の機種が開発されているが、一般的にはモータースイーパが使用されている。全面レヤーであるため、モータースイーパが自由に走行できるのでグリーンカットは300~400 m²/h と速く、従来の方法に対し2倍程度となっている。しかし、打設完了からグリーンカット開始までの時間は24~50 h で、従来の方法に対し5~10 h 長くなっている¹⁸⁾。

(8) 敷モルタル

打継目に1.0~1.5 cm 厚の敷モルタルを全面に敷き打継目の接着を図っている。このモルタルの上昇により下層部のコンクリートが良好となり、強度、水密性が增大している。

(9) 品質

RCD コンクリートの品質は単位セメント量が120~130 kg/m³ と少ないが、強度、密度、水密性などが良好である。各ダムで単位セメント量、リフト高、締固め回数などで差があるが、強度は130~170 kg/cm²、密度は2.35~2.45 t/m³、透水係数は10⁻⁶ cm/s 程度である^{2),9),12)}。

3. RCC 工法の特長

RCC 工法は、フィルダム施工の利点を取り入れ、経費の節減と急速施工を重点に考えられた工法で、ダム本体工事に適用されたのは、Willow Creek ダム(1982年)が最初である。具体的には、非常に貧配合超硬練りコンクリートを、ダンプトラック、または、ダンプトラックとベルトコンベヤ、モータースクレーパ等で運搬しブルドーザ、フィニッシャー等で敷き均し、振動ローラで締め固める方法である。

このような施工方法は、RCD 工法と同様であるが、RCC 工法は、①設計条件でのRCD 工法との違い、②下流面型枠を用いない、③使用セメント量が少ない、④打設ピッチが速い、⑤グリーンカットを行わない、⑥横継目がないか、少ない、⑦洗浄しない骨材を使用している、⑧ギャラリーは、空洞部分を砂利で置き換えてコンクリートを打設し、コンクリートの硬化後に砂利を取り除く方法、または、ペーパーによってギャラリーの復工を行う等の特徴がある^{19)~21)}。

このRCC 工法により最初に建設された Willow Creek ダムは、従来のダム施工と比較して工費、工期が約1/3 程度であるが、最も問題なことは堤体からの漏水が多いことと、堤体の上流面から下流面に通るクラックが発生し、このクラックからも漏水があること等である。写真-2 は RCC ダムの漏水状況である。また、クラッ



写真-2 Galesvilleのダム下流面(漏水状況)

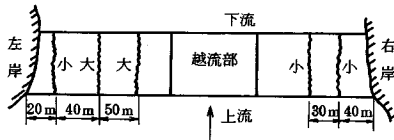


図-5 Galesville ダムのクラック状況

クは現地調査の結果、図-5のように上流から下流まで通じていた。

このようなことから、Willow Creek ダム以後に建設された Winchester ダム、Middle Fork ダム、Galesville ダム、Monksville ダム²²⁾などでは、上流面型枠際 30~90 cm 幅で従来コンクリートを打ち、また打継目処理として上流面より 2.0~2.5 m の範囲に従来コンクリートと同配合の敷コンクリートを打って上流側の漏水対策が行われた。しかし、すべてのダムで完全に漏水が止まるまでには至らなかった。そこで、Upper Stillwater ダムでは、骨材の最大寸法を 38 mm と小さくし、イギリス流に $C+F=247 \text{ kg/m}^3$ と、ペーストの多い配合を用いている。クラック防止対策として、このダムから初めて約 100 m 間隔に横継目の造成も行っている²³⁾。

また、Elk Creek ダムでは、日本の RCD 工法を参考として、①従来と同様の上流面コンクリート打設を行う、②全面のグリーンカットを行う、③全面に敷モルタルを行う、④横継目の造成を行う、等を実施しており、日本の RCD 工法に近い工法を採用するようになってきている^{24), 25)}。これらのダム規模の概要を示すと表-5 となる。次に RCC の特性についての主要な事項について述べる。

表-5 アメリカの RCC 工法による施工ダム

完成年	ダム名	高さ(m)	RCC 体積 (m ³)
1982	Willow Creek ダム	5.2	170,000
1984	Winchester ダム	2.1	24,500
1984	Middle Fork ダム	3.8	42,100
1985	Galesville ダム	5.1	160,800
1986	Monksville ダム	4.6	221,000
1986	Grindstone Canyon ダム	4.2	87,500
1987	Upper Stillwater ダム	8.7	1,070,000

(1) 設計

1986 年以前に完成したダムは従来の設計基準に基づいて設計しているが、Upper Stillwater ダムでは、開拓局が 1974 年に改訂した新基準に基づいて設計されている。

この新基準は RCC 工法と連動して作成されたものではない。しかしながら、わが国のコンクリートダムの基準で示されている安全率に比べて相当に低い安全率に

なっている。したがって、結果として新基準に基づく堤体の下流面勾配は急になっている。しかし、RCC ダムは堤頂部まで大型機械によって施工ができるように、堤頂幅を 9~14 m に拡幅している。

横継目は施工能率を考慮して設けず、この対策として半数程度の骨材製造を冬期に行い貯蔵するとか、氷・液体窒素によって冷却を行い、打込み時のコンクリート温度を低くし、さらに気温の低い春に大部分を打設する等の方法で施工している。しかし、このような施工を行ったにもかかわらずクラックが発生したため Upper Stillwater ダム以降に施工しているダムでは横継目の造成を行っている²³⁾。

(2) 上下流面および漏水対策

上下流面の施工は施工性、経済性を重視した構造となっている。上流面は、Willow Creek ダム、Winchester ダムではプレキャストパネル（写真-3）を使用した。パネル相互の十分な締め付けが困難であったので、Middle Fork ダム、Galesville ダムでは型枠を用いている。

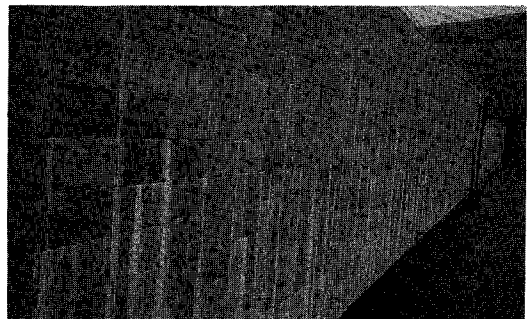


写真-3 Willow Creek ダム上流面（上流面パネル型枠）

下流面は型枠を用いず施工しているため写真-2に示すように締固めが不十分なため、表面の気象作用による風化を考慮して約 1 m 下流面を増厚している。凍結融解の激しい Middle Fork ダムでは上下流面に型枠を使

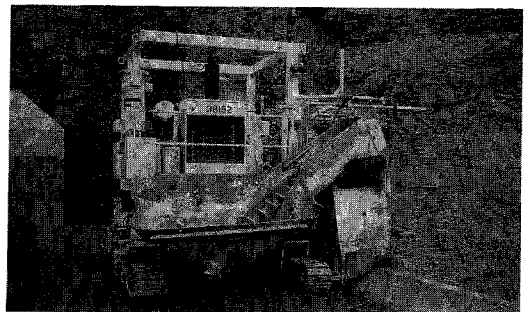


写真-4 Upper Stillwater ダム表面仕上げエレメント用のパーバー（1分間に約 1.5 m の速度）

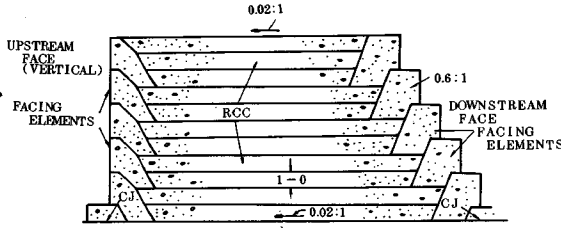


図-6 Upper Stillwater ダムの施工方法

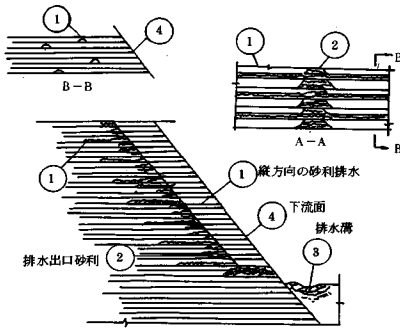


図-7 堤体内の排水構造

用し、富配合の外部コンクリートを用いている。

Upper Stillwater ダムでは、写真-4 に示すようなペーパーとよばれる機械によって、上下流面に表面コンクリートを図-6 に示すように施工している。

Willow Creek ダムでは漏水が多く、完成後、数回にわたるグラウトが必要であったため、これ以降のダムでは漏水対策として、上流面型枠際は 30~90 cm 幅で従来のコンクリートを打ち、打継目処理として上流面より 2 m の範囲に敷コンクリートを用いている。また、Monksville ダムでは、下流面から安全に排水できるように、図-7 に示す排水処置を行っている²²⁾。

Upper Stillwater ダムでは、図-6 に示す表面コンクリートの施工とフライアッシュを多く使用してペースト量を増し堤体の透水を防止している。Elk Creek ダムでは、RCD 工法を参考として、ジェット水によりグリーンカットを行い、敷モルタルを 1.25 cm 行い、上流面型枠際は 90 cm 幅で従来のコンクリートを打っている²³⁾。

(3) ギャラリー

ギャラリーは保守点検・観測器の設置の目的とは別に、堤体内に浸透してきた漏水の集水のために必要な構造物となっている。ギャラリーの施工は、ギャラリー部分の空洞部に骨材を置き、その上に RCC コンクリートを打ち込み、硬化後に骨材を取り出す方法である。この方法により施工した Galesville ダムの状況を写真-5 に示す。

Upper Stillwater ダムではペーパーによって、ギャラ

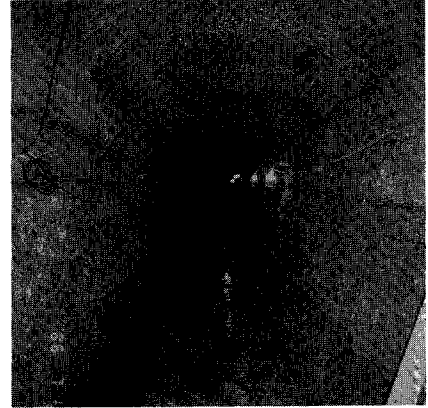


写真-5 Galesville ダムのギャラリー

リー内面コンクリートを施工している。

(4) コンクリート骨材および配合

骨材は堤体掘削岩、ダムサイト堆積砂利を洗浄せず使用しているダムが多く、骨材製造費の低減を図っている。また、冬期にも骨材の製造を行い、骨材温度低下を図ったり、骨材製造規模を小さくし経費の節減を図っている。RCC の配合は表-6 に示すように、C+F が非常に少なくなっている。Upper Stillwater ダムのみが、フライアッシュ量が逆に非常に多く使用されている。骨材の最大寸法は 76 mm で、RCD 工法の骨材最大寸法 80 mm とほぼ同様の大きさである。

表-6 RCC コンクリート配合

ダム名	G _{max} (mm)	C (kg)	F (kg)	C+F (kg)	W (kg)
Willow Creek ダム	76	47	19	66	107
Middle Fork ダム	76	71	0	71	77~95
Winchester ダム	75	104	0	104	-
Galesville ダム	76	53	36	89	72
Monksville ダム	76	62	0	62	-
Upper Stillwater ダム	88	77	170	247	107
Elk Creek ダム	76	70	38	108	113

(5) コンクリートの運搬

運搬方法はダムサイトの地形、地質、ダムの規模などにより種々の組合せによって施工しているが、表-7 に示すようにアメリカのダムは地形が緩やかでダム高が低いので、ダンプトラック、スクレーパによりパッチャープラントからコンクリート打設場所まで直送するものと、パッチャープラントから堤体上までベルトコンベヤにより堤体上はダンプトラックによるものとの 2 種類の方法が主である。

Willow Creek ダムは、堤体上まで 2 基のベルトコンベヤで運搬し、堤体上ではスクレーパ、ボトムダンプ、

表-7 運搬方法

ダム名	運搬方法	堤体まで	堤体上
Willo Creek ダム		2基のベルトコンベヤ	{ ホッパー→スクレーパ スクレーパ(後半) ボトムダンプ, リヤダンプ
Middle Fork ダム Winchester ダム Galesville ダム Monksville ダム Upper Stillwater ダム Elk Creek ダム		ベルトコンベヤ スクレーパ ダンプトラック (モータースクレーパ ダンプトラック) ベルトコンベヤ ダンプトラック	ホイローダ スクレーパ(直送) ダンプトラック(直送) (モータースクレーパ ダンプトラック(直送)) ダンプトラック ダンプトラック(直送)

リヤダンプなどによって運搬している。

また、Upper Stillwater ダムでも写真-6のように、パッチャープラントからベルトコンベヤで堤体上まで運搬し、堤体上はダンプトラックによって運搬している。このベルトコンベヤは簡単に上下が可能で、パッチャープラントの標高はダム高の中位の高さに設置されていて、パッチャープラントの位置を変更せず、堤体の下部から上部までベルトコンベヤで堤体上まで運搬が可能である。

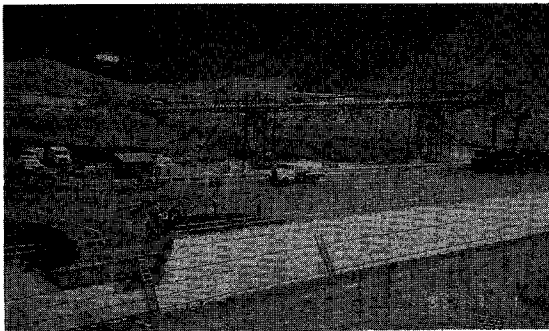


写真-6 Upper Stillwater ダムベルトコンベヤによる運搬

(6) コンクリートの敷均し

各ダムの敷均し方法は、表-8に示すようにブルドーザが主であるが、Galesville ダム、Upper Stillwater ダムでは敷均し機械を開発している。Galesville ダムでは、道路舗装用のフィニッシャーに近いスプレッダーボックスによる敷均しを行っている。また、Upper Stillwater ダムでは、写真-7に示すようにダンプトラックの後方に取り付けたスプレッダーとブルドーザによって敷均しを行っている。しかし、これらの両ダムとも敷均し後に側方に大粒径の骨材がある程度分離しており、この分離した骨材を3人の労務者がスコップによってかき上げていた。しかし、Upper Stillwater ダムは骨材の最大寸法が38mmで、また、フライアッシュの使用量が多いので、他ダムに比較して骨材分離が少ない。

(7) コンクリートの締め固め

締め固め機械は種々の機種を用いているが、これはダム規模の大小によるものと、技術者の考え方の差によるも

表-8 敷均し機械

ダム名	敷均し機械、方法
Willo Creek ダム	スクレーパ(かなり均等厚) ブルドーザグレーダ
Middle Fork ダム	ブルドーザ
Winchester ダム	ブルドーザ
Galesville ダム	スプレッダーボックス
Monksville ダム	ブルドーザ
Upper Stillwater ダム	ダンプにスプレッダー取付けとブルドーザ
Elk Creek ダム	ブルドーザ薄層撒き出し



写真-7 Upper Stillwater ダムのスプレッダーによる敷均し

のと考えられる。

締め固めリフト高は、30cmで土の締め固め厚さと同様に考えている。Elk Creek ダムでは、日本のRCD工法を参考にして60cmのリフト高で施工した。

締め固め回数は表-9に示すように30cmで4回、60cmで6回としている。打設速度は日当たり1~4リフトを打設し、非常に速い速度である。この施工速度の速い要因は、使用セメント量が少なく発熱が少ないこともあるが、グリーンカット、敷モルタルを行わない等、主として打継目の処理を原則として行わないためと考えられる。

表-9 敷均し、締め固め機械方法

ダム名	締め固め機械	リフト高	回数	打設速度
Willo Creek ダム	ボマーク 220 A9.5 t	30 cm	4 回	日 1~4リフト
Middle Fork ダム	インガソルランド DA50	30 cm	8~12回	日 2リフト
Winchester ダム	振動ローラ	30 cm		日 3~4リフト
Galesville ダム	ボマーク 220 DA	30 cm	4 回	日 4リフト
Monksville ダム	振動ローラ	30 cm		
Upper Stillwater ダム	10 t 振動ローラ	30 cm	4 回	日 2リフト
Elk Creek ダム	振動ローラ	60 cm	6 回	

(8) グリーンカット

施工速度の向上のためにはグリーンカットを行わないことも大きな要因となる。しかし、打継目の処理が十分でないこと、打継目の強度の低下、漏水などが生ずることがある。

RCC 工法では、原則としてグリーンカットを行わず施工速度の向上を図っている。しかし、コンクリート打設後、数日経過した場合にはグリーンカットを行っている

る。すなわち、Willow Creek ダムでは6日経過後、その他のRCCダムでは3日経過後に打設する場合にはグリーンカットを行っている。

Elk Creek ダムでは、打継目の全部についてグリーンカットと敷モルタルを行った。

(9) 品質

91日のコンクリート強度は、Willow Creek ダム 74 kg/cm²、Monksville ダム 112 kg/cm²、Galesville ダム 70 kg/cm²、Upper Stillwater ダム 217 kg/cm² となっている。

Upper Stillwater ダム以外は、セメント量が少なく、打継目処理が十分でないので透水性が大きく漏水が多い。

堤体表面は、貧配合であることと、下流側は型枠を用いていないため締固めが不完全であり、また、クラックも多く発生している。

4. RCC 工法と RCC 工法との特性に関する考察

前述のように、日本で開発したRCD工法と、アメリカで開発したRCC工法とは、それぞれの特性を有している。その要因は、安全性、経済性、施工速度、品質（強度、耐久性、漏水、クラック）等に対する基本的な考え方が異なっているためである。

ここでは、これらの特性について考察し、今後のRCD工法の発展の方向についても論ずるものである。

(1) 設計

重力ダムの設計の基本ともいえるべき、堤体のせん断に対する安全率は、たとえばアメリカ開拓局の例を取ればわが国の基準における安全率よりも低い値となっている。RCCは当然この低い安全率が適用されている。しかしながら、RCD工法の場合には、従来のコンクリートダムと同様の考え方に基づいているので、安全率は4.0を採用している。

安全率に対する考え方は、各国の実情によって異なるが、日本では、ダムの重要性を考慮しRCD工法の場合でも安全率は4.0を確保している。

また、上流面の引張応力についても、RCC工法の場合はある程度許容しているのに対して、RCD工法の場合には許容していない違いがある。

堤頂部の拡幅による大型機械施工は、RCC工法の場合にはすべてのダムで行っているが、RCD工法の場合には美利河ダムで行っているのみである。ダムの合理化施工のためには、堤頂部までRCD工法で施工できることが望ましい。このためには、堤頂部の拡幅によるコンクリート増加による費用の上昇もあるので、これらの比較検討を行って決定すべきである。または、拡幅せず、

小型機械を用いて、堤頂部までRCD工法によって施工する方法も考えられる。

(2) 上下流面および漏水対策

RCC工法の場合には、フィルダムに近い考えで施工速度の向上を重視し、下流面型枠を用いていないため、下流面コンクリートは50cm程度、崩落している所があり年々の凍結融解の激しい所ではますます風化が増大するものと考えられる。また、上流面の施工が十分でなく、貧配合コンクリートで、打継目処理も十分でないなどから漏水も多い。

これに対し、RCD工法では、上下流側について従来のコンクリートを用い、打継目は十分なグリーンカットを行い、15m間隔に横継目を設けてクラックの防止を図っていることなど、上下流面は従来のダムと同様に漏水もない。このようなことから、上下流面の施工および漏水対策については、現在のRCD工法で十分である。

(3) ギャラリー

ギャラリー、堤内放流管など堤体内構造物施工の合理化を計ることが重要であり、RCC工法ではギャラリーの施工に、骨材を仮置きしたり、ペーパーとよばれる機械を用い非常に簡易に施工している。

玉川ダムでは、先に鋼製型枠を組み立て設置しコンクリート打設する方法により合理化を図っている。このようにギャラリーの施工の合理化を図ることと、また、RCD工法固有の問題ではないが、ギャラリー周辺の鉄筋についても必要か否かの検討もすべきである。

(4) コンクリート骨材および配合

RCC工法は、骨材の製造費の低減を図るため、ダムサイト掘削岩の利用、洗浄しない骨材、冬期におけるストックと骨材の温度低下等の合理化を図っている。

ダム建設費に占める骨材費用の割合が大きいため、骨材製造費用の低減を図ることが重要で、また、骨材を冬期に製造し低温で貯蔵しておくことが、コンクリートのひびわれ対策上からも重要である。

RCC工法ではC+Fが非常に少なく、また、単位水量も小さな値を示している。

RCDコンクリートの配合の基本的な考えは、砂の空隙をペーストで満たすことが必要で、多少の余裕があることがよい。これを次のように表わすことができる。

$$\alpha = \frac{\text{ペーストの容積}}{\text{細骨材の空隙容積}}$$

この α の値は島地川ダムで1.2、大川ダムで1.18とRCD工法のダムでは、1.2に近い値となっている。これに対し、Willow Creek ダム 0.67、Middle Fork ダム 0.64、Galesville ダム 0.64であり、 α の値が非常に小さな値を示している。このように α の値が小さいことは、コンクリート内に多量の空隙があることを示してお

り、結果的に漏水の要因にもなっているものと考えられる。Upper Stillwater ダムでは $\alpha=2.0$ 、Elk Creek ダムでは $\alpha=1.2$ と $C+F$ を増加している。

均一のコンクリートを確保するためには α の値が 1.0 以上とすることが必要で、多少の余裕を見込み、一般に RCD 工法の 1.2 程度が適している。

(5) コンクリートの運搬

コンクリートの運搬は、RCC 工法の場合には①ベルトコンベヤとダンプトラック、②ダンプトラック直送が主である。また、RCD 工法の場合には①インクラインとダンプトラック、②ダンプトラック直送が主体である。

コンクリートの運搬方法は、地形、地質、ダム規模によって最適な方法を選定することが重要であり、RCD 工法でも、ベルトコンベヤとダンプトラックの組合せを合せて検討すべきである。地形が急でダム高が 80 m 程度以下のダムでは、ダムの中位標高にパッチャープラントを設置し、これから堤体上までベルトコンベヤで運搬する方法が適する場合もある。

(6) コンクリートの敷均し

RCC 工法では、リフト高が 30 cm であり、Galesville ダムではスプレッダーボックス、Upper Stillwater ダムではダンプトラックにスプレッダーを取り付け、これらの機械によってコンクリートを敷き均している。しかし、これらの敷均し機械でも骨材の分離が生じている。

これに対して、RCD 工法では、リフト高が 50~100 cm と高く、骨材の粒径も大きい、数回に分けて放射状に、かきまぜながら敷き均す薄層まき出し方法により骨材の分離を防止している。また、Elk Creek ダムでも薄層まき出し方法とした。

コンクリートの敷均しは、薄層まき出しを行うことによって骨材の分離がほとんどなくなり、ブルドーザが走行することによる締固め効果もあり、敷均し機械の開発も必要であるが、この薄層まき出し法は推奨されるべきである。

(7) コンクリートの締固め

締固め機種は、RCC 工法ではダム規模の大小によって機種を変えているが、RCD 工法では現在までに施工したすべてのダムでボマーク BW 200 を用いている。RCD 工法の場合にも、ダム規模、施工状況に応じて他機種を使用することがよいものと考えられる。

締固めリフト高は、RCC 工法の場合には 30 cm と小さいが、日当たり 1~4 リフトで非常に速い打設速度となっている。これは、リフト高を小さくして締固め効果を上げ、グリーンカットを行わず打設速度を上げているものであるが、打継目の強度低下、打設速度が速いため温度上昇によるひびわれ等の問題が発生するおそれがある。これに対し、RCD 工法の場合には、締固めリフト

高が 50~100 cm と大きく、打設速度は RCC 工法に比べて遅くなっているが、十分なグリーンカットを行い、打継目の透水防止と強度の向上を図り、打設面からの熱発散を行い、ひびわれ防止を図っている。

このように、RCC 工法の場合には品質より施工速度に重点をおいているのに対し、RCD 工法の場合にはコンクリートの品質を最優先に考え、そのうえで施工速度の向上を図っている。

(8) グリーンカット

RCC 工法ではリフト高が小さく打継目の接合を重視せず、打設速度を重視し原則としてグリーンカットを行っていない。このため、打継目からの漏水も発生している。これに対して RCD 工法では十分なグリーンカットを行ったうえで 1.0~1.5 cm の敷モルタルを行って打設しているため、打継目の強度も大きく、ダム本体にボーリングを行い測定した透水係数も 10^{-6} cm/s 程度で漏水も発生していない。

このようなことから、Elk Creek ダムでは、RCD 工法と同様にグリーンカットを行い、敷モルタルも行った。

5. RCD 工法の最適化

RCD 工法は、開発後いろいろと改良が加えられ発展し、現在の施工に至っているが、より合理化を旨とするためには、RCC 工法の長所も参考とし、次の事項について検討し、施工法の改良を加えることも必要である。

(1) 打設速度の向上

RCD 工法の打設速度を今後より向上させることが必要で、そのためには、コンクリート温度上昇対策を実施し打設間隔を小さくすること、グリーンカット施工法の改良と施工機械の開発を行い、グリーンカット開始時間を早くし施工時間も短縮することなどが必要である。

(2) 最適運搬方式の確立

運搬方法は合理化施工の基本であり、地形、地質、ダム規模によって変わるので、種々のケースについて検討し、最適運搬方式を選定することが必要である。そこで、現在では実施されていない、たとえばベルトコンベヤで堤体上まで運搬し、堤体上はダンプトラックで運搬する方法や、上部はポンプ打設等のケースも加え、地形、地質、ダム規模に応じて最適運搬方式を確立することが必要である。

(3) ダム上部施工の合理化

RCC 工法では、すべてのダムで堤頂部を広くして、堤頂部まで RCC 工法で実施しているが、RCD 工法では、美利河ダム以外はすべて、堤頂部を広くせず従来工法に近い工法で施工している。このため、堤体上部の施工は合理化が図られず工期も長くなっている。このようなことから、RCD 工法の場合にも、堤頂部を広くして

施工するなど、堤頂部の施工の合理化に積極的に取り組む必要がある。

(4) 堤体材料費の低減化

ダム工費に占める骨材の比率は非常に大きく、安価な骨材を使用することが重要である。従来は一般に良質な骨材を使用することを重視していたが、近年はダムの近くで良質の部材が得られないこと、RCD工法では振動ローラで締固めを行うため、0.15 mm以下の細粒分がある程度多い方が良質なコンクリートとなることが明らかになっている。

また、RCC工法では、ダムサイトの掘削した骨材を用いたり、洗浄しない骨材を使用して良好な結果を得ている。また、骨材を洗浄しない場合には、シックナーなどの濁水処理費が不用となり大きな経費の低減となる。

このようなことから、RCD工法でも安価な骨材の生産と施工法の検討が必要である。

6. あとがき

ダム技術開発は世界の各国で進められているが、近年ではRCD工法、RCC工法が代表的であり、それぞれ近い工法であるが細部的には大きな差がある。しかし、アメリカでも、日本で開発したRCD工法を参考としRCD工法と同様の工法で施工しているダムもある。また、中国でもRCD工法によるダム建設が進められようとしている。このようにRCD工法の優位性が世界の各国にも認められつつある。

このようなことから、ダム技術をますます発展させるためには、RCD工法を基本とし、RCC工法の長所も採用し、あわせて新しく技術開発を行って、より合理的な施工方法を改良、開発することが必要である。

本文は、建設省、県、国土開発技術研究センター、ダム技術センター、日本ダム協会等の資料も参考にさせて頂いたことを付記し、関係者各位に深く謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 鈴木徳行：RCDコンクリートによる島地川ダムの合理化施工，Vol. 65-11，土木学会，1980年。
- 2) 鈴木徳行：RCD工法による島地川ダム施工，コンクリートライブラリー，第46号，土木学会，昭和55年4月。
- 3) 志水茂明：大川ダムの計画と工事概要，土木技術32巻10号，1977。
- 4) 鈴木徳行：最近におけるダム技術の動向と課題，ダム日本，No. 506，日本ダム協会，1986.12。
- 5) 志水茂明：ダムの合理化施工技術について，ダム技術，Vol. 2-1，1984年。
- 6) 広瀬利雄・竹林征三：Present State of Problems of

Rationalized Construction of Concrete Dams, Concrete Library of Japan Society of Civil Engineers, 1983. 12.

- 7) 志水茂明・竹村公太郎：RCDコンクリートによる大川ダム上流仮締切りダムの試験施工，コンクリート工学，Vol. 16, No. 4, April 1978.
- 8) 下村 周・柳川城二：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.
- 9) 原田譲二・岡田輝夫：玉川ダムにおけるRCD工法，ダム技術，Vol. 3, 1985年。
- 10) 志水茂明・竹村公太郎：軟弱基礎岩盤上のコンクリート重力式ダムの設計と施工，大ダム，No. 93, 1980. 9.
- 11) 鈴木徳行・坂田俊之：RCDコンクリートの諸問題，セメントコンクリート，No. 399, May 1980.
- 12) 広瀬利雄・志水茂明・竹村公太郎：RCDコンクリート工法によるダムの施工に関する研究，土木学会論文報告集，第303号，1980年11月。
- 13) Shimizu, S. and Takemura, K. : Design and construction of a concrete gravity dam on a weak bedrock, commission internationale des grands barrages 1979.
- 14) 高島博義：真野ダムRCD工法，ダム技術，Vol. 1, 4-2, 1986年。
- 15) 清田市郎・中 哲男：朝日小川ダムのRCD工法について，ダム技術，Vol. 3, 1985年。
- 16) 建設省中国地方建設局島地川ダム工事事務所：島地川ダム工事誌，昭和57年3月。
- 17) Shimizu, S., Yanagida, T. and Jojima, S. : The development of the r.c.d. method in Japan, Water Power & Dam Construction, January 1986.
- 18) 財団法人国土開発技術研究センター編：RCD工法によるダム施工，1981年7月。
- 19) Ernest K. Schrader : The First Concrete Gravity Dam Designed and Built for Roller Compacted Construction Methods Concrete International, October, 1982.
- 20) Ernest Schrader and Richard Mckinnon : Construction of Willow Creek Dam, Concrete International, May 1984.
- 21) Hansen, K.D. : Roller compacted concrete developments in the USA, Water Power & Dam Construction, January 1986.
- 22) Elias, G.C., Campbell, D.B. and Schrader, E.K. : Monksville Dam—A Roller compacted concrete water supply structure, Mission International Lausanne, 1985.
- 23) V.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation : Mix Design investigation—roller compacted concrete construction, Upper Stillwater Dam, Utah, June 1984.
- 24) William, G. : Rollcrete dam design evolution, Corps's Elk Creek RCC dam includes lessons from Willow Creek, ENR/July 10, 1986.
- 25) Hansen, K.D. : RCC '88 will review recent developments, Water Power & Dam Construction, February 1988.

(1988. 9. 14・受付)