

技術展望

ダムコンクリートの歴史

HISTORICAL DEVELOPMENT OF CONCRETE DAMS

廣瀬利雄*・柳田 力**

Toshio HIROSE and Tsutomu YANAGIDA

*(財)ダム水源環境整備センター理事長
(〒102 東京都千代田区麹町 2-14-2)

**(財)土木研究センター専務理事

*Keywords: concrete dam, construction method,
temperature control, construction control,
historical development*

1. コンクリートダム建設の略史

日本におけるコンクリートダムは、神戸市が水道用水確保の目的で建設した布引五本松ダム（高さ 32 m, 堤体積 2.2 万 m³, 1990 年）に始まるという。そして、初の 80 m 級ダムである小牧ダム（高さ 79 m, 堤体積 29.9 万 m³, 1926~1929 年）が建設されるまでの約 30 年間、小牧ダムに続く大規模なダムとしては、機械化施工の始めとされる大井ダム（高さ 53 m, 堤体積 15.3 万 m³, 1924 年）のみである。

小牧ダムは、設計面では最新のダムの耐震設計理論を取り入れ、施工面では温度ひびわれ対策として横継目を設け、また揚圧力軽減のための基礎排水孔を配置した画期的なダムである。小牧発電工事報告¹⁾によれば、骨材は河川砂・砂利を用いて最大寸法 80 mm 程度、普通セメント使用、容積配合、セメント使用量 4 種類（最大：300 kg/m³, 最小：210 kg/m³）で、スランプ 10 cm 程度のコンクリートをシュートで流下させ、打ち上げ厚さを 30 cm とし、上下流面間を一層で仕上げる、いわゆるレヤー式の施工法であった。コンクリート作業は昼夜連続で行われ、順調な時、0.75 m³ ミキサ 4 台を用いて、労務者約 30 名により 1 日辺り約 1,000 m³ (0.75 m³ ミキサ 4 台, 労務者約 30 名) 施工された。

小牧ダムの建設後、ほぼ同規模のものとして祖山、千頭、泰阜の各ダムがあるが、上回る規模のダムとしては塚原ダム（高さ 87 m, 堤体積 36.3 万 m³, 1936~1938 年）に至る。

塚原ダムは、吉田徳次郎博士の技術指導を受けて九州電力が建設したダムで、柱状ブロック工法の採用、低発熱セメント^{2),3)}・粒度調整骨材の使用、重量配合、スランプ 3 cm 程度の硬練りコンクリート、ケーブルクレーン・内部振動機の使用等骨材採取から打込みまで一貫し

た工事の機械化の採用で、RCD 工法が現れるまでのダム施工の原型ともいえる施工法による画期的なダムである。

1940 年以降は、戦時の事情もあって、新規事業はもとより着工中の工事も中止され、国内では目立つ発展はないが、海外において鴨緑江の水豊ダム、松花江の豊満ダム等の大ダムが日本のダム技術により建設された。

水豊ダム（高さ 106 m, 堤体積 327 万 m³, 1938~1943 年）⁴⁾は、これまでに蓄積された技術をさらに発展させて建設された巨大なダムで、コンクリートの練混ぜに 0.75 m³ ミキサを 12 台、打込みには、9 t ジブクレーン 6 基、ガンリン機関車 16 台、3 m³ バケツ 68 台等一連の設備を用いて、日最大 6.8 千 m³, 年最大 99 万 m³ という記録的な施工を行い、5 年という極めて短期間で完成させた。

戦後、社会経済の復興とともに電力需要が増大し、さらに洪水調節、農業用水確保等のため、中止中の平岡、丸山、小河内等のダム工事が相次いで再開された。また、初めて 100 m を越える大規模アーチダム、上椎葉ダムが建設された。これらの工事において混和剤やフライアッシュの使用、粒度調整を行った人工骨材の全面的使用、全自動式パッチャープラントの採用やクーリングの実施等それぞれ部分的に顕著な技術的進歩はみられるが、佐久間ダム（高さ 156 m, 堤体積 109 万 m³, 1953~1956 年）⁵⁾は、岩盤掘削、骨材採取等に 2 m³ のパワーショベル、15 t ダンプトラックを用い、コンクリートの打込みには 25 t のケーブルクレーンを用いる等大型機械による終始一貫した機械化施工により、ダム地点で 100 m を越える断崖の続く峡谷における難工事を 3 年の短期間で終えた画期的な大工事である。

佐久間ダム建設以降の数年間に、コンクリートダムとして堤体積最大の田子倉ダム（高さ 145 m, 堤体積 195

コンクリートダム技術関連年表

西暦	(年号)	項目	特記事項
1900	(明 33)	布引五本松ダム(神戸市) 高さ: 33 m	日本初めてのコンクリートダム
1911	(明 44)	黒部ダム(東京電力) 高さ: 37 m	初めての発電専用重力ダム
1921	(大 10)	浦山取水ダム(東京電力) 高さ: 12 m	初めてのアーチダム
1923	(大 12)	笹流ダム(函館市) 高さ: 24 m	初めてのバットレスダム
1924	(大 13)	大井ダム(関西電力) 高さ: 53 m	ミキサ, ガソリン機関車, ケーブルクレーン等による初めての機械化施工として著名
1927	(昭 2)	河内ダム(八幡製鉄) 高さ: 43 m	初めて高炉セメントを使用
1929	(昭 4)	小牧ダム(関西電力) 高さ: 79 m	大ダム(耐震設計, 揚圧力対策, 横継目の設置等によるひびわれ防止, 監査廊設置)
1929	(昭 4)	祖山ダム(関西電力) 高さ: 73 m	レヤー長さが最大(84 m)
1934	(昭 9)	低発熱セメント製造開始	商品名「アサノ・マスコンセメント」西多摩工場で生産
1935	(昭 10)	「河川堰堤規則」内務省令第 36 号 「発電用高堰堤規則」商工省令第 18 号	
1935	(昭 10)	二級ダム(広島県) 高さ: 32 m	初めての多目的(洪水調節, 発電, 都市用水)ダム
1936	(昭 11)	泰阜ダム(中部電力) 高さ: 50 m	重量配合比の採用, ウォークリータの使用
1938	(昭 13)	塚原ダム(九州電力) 高さ: 87 m	低発熱セメント, 柱状ブロック工法(グラウト無), 骨材採取・製造からコンクリート打設まで一貫した機械化施工による大ダム
1942	(昭 17)	土木学会「無筋コンクリート標準示方書」 第 2 部重力堰堤制定	(昭 24)「重力ダムコンクリート標準示方書」として改定
1943	(昭 18)	三浦ダム(関西電力) 高さ: 86 m	堤体積 51 万 m ³ , の大ダム
1945	(昭 20)	相模ダム(神奈川県) 高さ: 58 m	ベルトコンベア方式による初の堤体打設
1952	(昭 27)	平岡ダム(中部電力) 高さ: 63 m	初めて AE 剤を使用
1953	(昭 28)	JIS R 5210「ポルトランドセメント」に 中庸熱セメントの規格を新設	水和熱の規格値を規定
1953	(昭 28)	田瀬ダム(建設省) 高さ: 82 m	建設省設計による初の国有コンクリートダム
1954	(昭 29)	本名ダム(東北電力) 高さ: 52 m 上田ダム(東北電力) 高さ: 34 m	初めて減水剤を使用
1954	(昭 29)	丸山ダム(関西電力) 高さ: 98 m	単位セメント量: 160 kg/m ³ 細骨材の粒度調整, 傾斜継目, 全自動型パッチャープラントの採用, プレクーリングを実施
1954	(昭 29)	須田貝ダム(東京電力) 高さ: 72 m	初めてフライアッシュを使用
1955	(昭 30)	長安口ダム(徳島県) 高さ: 86 m 荒沢ダム(山形県) 高さ: 61 m	ロッドミルにより製造した砕砂の使用(昭 25)
1955	(昭 30)	上稚葉ダム(九州電力) 高さ: 113 m	初めての近代的なアーチダム, リフト: 2 m パイプクーリングとプレクーリングを実施
1956	(昭 31)	AE 剤・フライアッシュ規格(案)	土木学会コンクリート標準示方書に提示
1956	(昭 31)	五十里ダム(建設省) 高さ: 112 m	100 m を超えた重力ダム
1956	(昭 31)	佐久間ダム(電源開発) 高さ: 155 m	150 m を超えた重力ダム, 柱状ブロック工法, パイプクーリングとプレクーリングを実施, 大型施工機械による一貫した施工方式の採用
1956	(昭 31)	糠平ダム(電源開発) 高さ: 76 m	レヤー工法, プレクーリング(粗骨材も冷却)を実施
1957	(昭 32)	日本大ダム会議「ダム設計基準」制定	滑動安定の検討にせん断摩擦安全率を適用
1957	(昭 32)	井川ダム(中部電力) 高さ: 104 m	初めての中空重力ダム
1957	(昭 32)	小河内ダム(東京都) 高さ: 149 m	(昭 18 一時中止, 昭 23 再開), 柱状ブロック工法, パイプクーリングとプレクーリングを実施
1957	(昭 32)	鎧畑ダム(秋田県) 高さ: 59 m	特記仕様書による高炉セメントの使用
1957	(昭 32)	鳴子ダム(建設省) 高さ: 95 m	多目的ダムで初めてのアーチダム
1958	(昭 33)	JIS A 6201「フライアッシュ」制定	
1959	(昭 34)	佐々並川ダム(中国電力) 高さ: 67 m	薄肉アーチダム
1960	(昭 35)	JIS R 5211「高炉セメント」改正	(大 15) 規格制定の後, 数回の改定を経て, 今回改正より水和熱について記載

西暦	(年号)	項目	特記事項
1960	(昭35)	田子倉ダム(電源開発)高さ:145 m	堤体積 195万 m ³ 重力ダムとして日本最大, 単位セメント量: 140kg/m ³
1961	(昭36)	奥只見ダム(電源開発)高さ:157 m	重力ダムとして日本最高単位, セメント量: 140kg/m ³ , 初めてフライアッシュをペーストとして使用
1961	(昭36)	有峰ダム(北陸電力)高さ:140 m	ブロック長が最大(55 m)
1962	(昭37)	坂本ダム(電源開発)高さ:103 m	最高の設計基準強度(470kgf/cm ²), 硬練り(スランプ: 2 cm) コンクリートの使用
1962	(昭37)	畑薙第一ダム(中部電力)高さ:125 m	中空重力ダムとして日本最高, 堤体積 59.8万 m ³ 日本最大
1963	(昭38)	一ツ瀬ダム(九州電力)高さ:130 m	
1964	(昭39)	黒部ダム(関西電力)高さ:189 m	アーチダムとして日本最高
1966	(昭41)	川俣ダム(建設省)高さ:117 m	薄肉アーチダム(厚さ最大: 12 m, 最小: 4 m)
1967	(昭42)	矢木沢ダム(水資源開発公団)高さ:131 m	
1969	(昭44)	日本大ダム会議「ダム設計基準」改定	アーチダム・中空重力ダムの基準の整備, 組合せ応力下の許容応力の設定
1969	(昭44)	奈川渡ダム(東京電力)高さ:155 m	
1969	(昭44)	高根第一(中部電力)高さ:133 m	
1971	(昭46)	矢作ダム(建設省)高さ:110 m	放物線形状のアーチダム
1974	(昭49)	建設省「コンクリートダムの合理化施工」の検討に着手	「コンクリートダム合理化施工に関する研究委員会」を設置(委員長: 国分正胤博士)
1976	(昭51)	草木ダム(水資源開発公団)高さ:140 m	
1978	(昭53)	早明浦ダム(水資源開発公団)高さ:106 m	フィレットの設置
1980	(昭55)	島地川ダム(建設省)高さ:90 m	RCD工法による合理化施工, RCCを含めて世界で初めての本格的施工
1982	(昭57)	JIS A 6204「コンクリート用化学混和剤」制定	AE剤・減水剤について規定
1983	(昭58)	川治ダム(建設省)高さ:140 m	放物線形状のアーチダム
1985	(昭60)	長与ダム(長崎県)高さ:36 m	ポンプ工法による合理化施工
1987	(昭62)	玉川ダム(建設省)高さ:103 m	RCD工法による100 m級ダム
1990	(平2)	高滝ダム(千葉県)高さ:25 m	ベルトコンベヤ工法による合理化施工
1991	(平3)	布目ダム(水資源開発公団)高さ:72 m	拡張レヤー工法による合理化施工
工事中		宮ヶ瀬ダム(建設省)高さ:155 m	
工事中		浦山ダム(水資源開発公団)高さ:155 m	
工事中		温井ダム(建設省)高さ:155 m	

万 m³, 1960年), 重力ダムとして最高の奥只見ダム(高さ 157 m, 堤体積 163.6 万 m³, 1961年), 中空重力ダムとして日本最高の畑薙第一ダム(高さ 125 m, 堤体積 59.8 万 m³, 1962年), 日本最高の黒部ダム(高さ 189 m, 堤体積 159.8 万 m³, 1964年)等 150 m 級の歴史的な大ダムが続々と建設された。

なお, 特殊な形式としてパットレスダム〔代表例: 笹流ダム〕があるが, 1920~1935年に数箇所建設された後は, この形式は凍結融解による部材の損傷の問題等の理由により建設されていない。

戦後間もない頃は, 米国の手法を取入れた形でダム建設が進められていたが, 物質不足に悩む日本としては堤体積の少ないダム形式が非常に魅力的であったため, 設計面の技術的進歩⁹⁾とあまって, 重力ダムより 20~

30% 減少できる中空重力ダム, 60~70% 減少できるアーチダムの建設も多く行われた。1965年以降になると日本経済の発展とともに, 全体工事費の内人件費の占める割合が次第に上昇してきたため, 複雑な形状の型枠を必要とする中空重力ダム, アーチダムは総合的なコンクリート単価の面で不利となってきた。一方, ダム建設地点も地形・地質に恵まれた地点がなくなり, 力を基礎岩盤に広く分散して伝えられる堤体積の大きいダム形式が選定される機会が多くなり, ますますコンクリート単価の引き下げがダム技術の重要課題となってきた。

これらを背景として, 1974年, 建設省の主導によりコンクリートダムの合理化施工に関する委員会(委員長 国分正胤博士)を設置して, コンクリートダム建設全体を総合的に見直すこととなった。

表-1 低発熱セメントの性質

ダム名	使用セメントの区分	比表面積 cm ² /g	水和熱 cal/g		鉱物組成		記事
			7日	28日	C ₃ S	C ₂ A	
塚原	中庸熱	3.230	52.7	71.9	28.4	1.1	フライアッシュ (30%)
上椎	〃	3.170	56.3	71.9	36.4	5.1	
佐久間*	〃	3.010	57.6	75.0	41.4	5.9	
小河内	〃	3.040	58.2	74.6	41.6	4.4	
奥只見	〃	3.040	64.8	78.3	45.1	3.7	
鑑畑**	高炉	3.730	60.2	79.0	57	6	
菌原**	〃	3.550	57.5	74.8	51	6	

注：試験値は文献7)による。なお、*印は文献13)に、**印は文献8)による。

その後のコンクリートダム合理化施工の進展は多くの論文、工事報告等関係資料に示されているとおりである。

2. コンクリート材料の進歩

コンクリートダムにおける低発熱セメントの使用は1932年頃より世界的な傾向であった。ほぼ同時期に日本でも、低発熱で長期材令における強度の高いポルトランドセメントの研究が行われ、1936年に初めてこの低発熱セメントが塚原ダムに用いられた。セメント仕様書に示された水和熱（溶解熱法）は、7日：80 cal/g以下、28日：90 cal/g以下であったが、納入品は、当初、発熱に対する慎重な配慮の結果、気温の低下する冬季に現場養生でやや低い圧縮強度を示した。しかし、改善後、この低発熱セメントは極めて好評の結果を得た。以降、施工現場の要求に添った品質改善がさらに図られて、水和熱と施工面から必要となる初期強度との両者の調和を考えた製品が使用されている（表-1）。

大ダムのコンクリートにフライアッシュが初めて用いられたのは、1953年から工事の始った須田貝（現：橋俣、高さ72m、堤体積20.4万m³、1954年）ダムである。その後、ワーカビリティーの改善、長期材令における強度・水密性の増進という特徴とこれらに基づく単位セメント量低減の可能性があることから、多くのダムにおいて、セメント使用量の20～35%程度使用されるようになった。当初は、フライアッシュを採取生産できる火力発電所も少なく品質の変動もあったが、研究が進み、規格も制定され、さらに次第に優秀な設備を備えた火力発電所が増加してフライアッシュの品質は向上した。

国分正胤博士と奥只見ダムの技術陣との共同研究⁹⁾によって、フライアッシュをスラリーとして使用すると取扱が容易でしかも品質も安定するとの研究が進み、1957年から始る奥只見ダムに適用され、ダムコンクリートの品質改善はさらに進歩した。

フライアッシュの品質は、その後、海外炭の使用と大気汚染防止に係わる環境保全の重視等石炭火力発電の事情の変化により、粉末度がやや細くなる、球状粒子が

減る、強熱減量が増加する等の変化¹⁰⁾を生じたが、品質試験を行って、現在なお多量に使用されている。

高炉セメントが製造されたのは、官営八幡製鉄所で、当初は、主として構内に使用するためのものであった。その後間もなく規格が制定され、数次の改訂を経ながら、戦時下の特殊な事情もあって広く使用された。ダムへの使用の始まりとしては、河内ダム（高さ43m、堤体積6.3万m³、1927年¹¹⁾）であるが、初めて、ダム用セメントとして水和熱と質の均一性を含めた特記仕様書を定めて、50：50の高炉セメント¹²⁾を用いたのは鑑畑ダムである。最近、ダム中腹部に排水管を設置する必要から掘削した結果、コンクリートの品質は極めて硬く緻密であり、上流面の中性化も、フェノールフタレイン、アリザニンイエローR及びニトラミンの3種類の指示薬による測定結果でも3mm以下と極めて小さい値であった。

ダム用高炉セメントの使用割合は、中庸熱ポルトランドセメントあるいは混合材としてフライアッシュを添加しているセメントと比較して少ないが、1970年代より高炉の大型化が進展するとともにスラグ製造技術もさらに進歩し、品質も安定して、使用割合はやや増加した。最近、長谷ダム（関西電力）、札内川ダム（北海道開発局）等の各ダム用コンクリートにも用いられている。

3. コンクリートの品質改善と高度化¹³⁾

1920年代、小牧ダム建設の頃は、容積計量で、しかも鉄製樋を流下させるタワーシュート方式の打込みのため、スランプ10cm程度のコンクリートに打込み現場で、玉石を10%程度加えながら突固める施工方法であったが、ミキサによる練混ぜは、セメント糊状態を作ってから砂・砂利を混ぜることが良いとする吉田徳次郎博士の提唱（1929年）をうけて、ウオーセクリータと重量計量を取り入れられ、さらにコンクリートの均質さに問題のある玉石コンクリートを突き固める施工法からスランプ3cm程度の硬練りコンクリートをケーブルクレーンで運搬し、これを振動機で締固める近代的な施工法になった。この塚原ダムにおける施工法が広く普及し、同

表—2 ダム示方書条文における単位水量と単位セメント量

示方書 (ダム名)	単位水量 kg/m ³	単位セメント量 kg/m ³		記 事
		内 部	外 部	
(小 牧)	→	210	270	目標スランブ: 10 cm. W/C: 60% 程度 目標スランブ: 3 cm 振動機を用いない場合: 210 kg/m ³
(塚 原)	150*	220	273	
1942 (S 17)	160	190*	—	
1949 (S 24)	150	180	245	耐久性から定める W/C の最大値 試験により定める 18 ダム試験配合 (MSA 80 mm) の平均値
1956 (S 31)	125	170	230	
1967 (S 42)	120	160	220	
1974 (S 49)	120	140	60%*	
1986 (S 61)	120	—*	—*	
RCD 実績	100*	120	210	

注: 1949 (S 24) は昭和 24 年版 (1949 年) ダムコンクリート標準示方書

時に機械化作業に影響するワーカビリティについて関心も著しく高まり、ダムコンクリートの均質性は著しく向上した。

1945 年以降、コンクリート品質の革命的な改善は AE コンクリートであろう。平岡ダムで AE 剤が初めて用いられ、さらに多くの試験結果から、AE コンクリートは単位水量の減少と凍結融解に対する抵抗性増進とに特別な効果のあることが確認されて、昭和 31 年版ダムコンクリート標準示方書 (以下 31 年版示方書 (1956) と示す) から、ダムコンクリートに AE コンクリートを用いることが前提となり、42 年版示方書 (1967) からは原則となった。この頃の施工の実例によれば、単位水量は、フライアッシュ使用による効果とあいまって、粗骨材最大寸法 100 mm 程度の場合でも 100~105 kg/m³ であったことから、標準示方書中の 4 章「配合」に示されている単位水量の上限規定がそれまでと比較して大幅に引き下げられた (表—2)。減水剤は、強度増進の効果が重視されて、主としてアーチダムに用いられた。

機械化施工の普及によって、硬練りコンクリートの使用とワーカビリティを重視する考えが広まったが、ワーカビリティの変動に大きく影響する細骨材の表面水の変動を安定化することが注目され、細骨材の粒度調整について関心が高まった。ロッドミルを用いた製砂は、細骨材の量的不足を補うため、1950 年頃から長安口、荒沢、上椎葉の各ダムで行われていた。細骨材を所定の粒度に管理する粒度調整には、ロッドミルを用いて細かい砂を製砂してあらい砂と組合わせたり、ドルコサイザー等ハイドロリックサイザーを用いて分級し再調整する方式があって、それらの方法はそれぞれ効果を挙げてはいた。

奥只見ダムにおける研究¹⁴⁾により、ロッドミルによる製砂自体に粒度調整機能もあることが分かり、この方式を主にすれば、比較的固定経費が少なく、経済的に安定した品質の細骨材が得られるところから、より少ないセメント量で所定の性能を確保することの出来る、いわゆるコンクリート品質の高度化が可能となった。

これまで述べてきたダム工事の実績は、その時点のダムコンクリート示方書に反映されているが、コンクリートの品質に密接な単位水量と単位セメント量とを示すと表—2 のようである。表中に示される単位量の変化がダムコンクリート技術の進歩を示しているといえよう。

4. 機械化施工の進展

ダム建設には、骨材の採取・製造、セメント等の材料運搬、コンクリートの練混ぜ・運搬、打込み等の各工程があるが、適正な品質のコンクリートを施工するには、それら各工程における人力施工には限界があるため、ダム建設に際しては可能なかぎり最新の機械の導入が検討されてきた。電力・都市用水ダムでは施工速度がより重要視されることから、特に能力の高い大型機械が選ばれてきた。

佐久間ダムの建設における機械化¹⁵⁾は、各工程の機械化にとどまらず、骨材採取から終始一貫した機械化であり、それまでの規模より一段と大規模なものであった。

骨材は、4 台のパワーショベルと 2 台のバックホーで採取した後、20 台のダンプトラック (15 t) で、3 次までのクラッシャーを有する 700 t/h^(注) のプラントに運び、それを粗骨材は 4 種類に分類し、細骨材はドルコサイザーを用いて粒度調整して貯蔵した。そして、全自動式パッチャープラントにおいて、パラセメントと骨材等とを 4 台の 3 m³ ミキサを用いて練混ぜ、25 t のケーブルクレーン 2 基で打込んでいる。ここでは骨材等材料の運搬はベルトコンベヤーが主役であった。柱状ブロック工法のため、プレクリーニングおよびパイプクリーニングを行いながら、日平均 3 千 m³、最大 5.2 千 m³ の打設を行った。

米国のアトキンソン社の技術援助で行われた佐久間ダムの機械化は、巨大な工事を短期間に実施するために必

(注) <骨材設備規模の参考> 塚原ダム: 60 t/h, 建設省多目的ダム (1960 年調査) 100~200 t/h, 丸山ダム: 260 t/h, 小河内ダム: 420 t/h

然的なものであって、1950年代前半の1.5 m³ ミキサを用いて日平均0.5千m³程度のコンクリート打込み量が主流であった工事とは一線を画するものであり、その後の田子倉及び、奥只見ダムにおける日最大6.5千m³、黒部ダムにおける日最大8.6千m³等大ダム建設の先駆となるものであった。

さらに、機械設備がただ巨大であったということに止まらず、使用材料（製造品を含めて）の規格化・標準化（均質化）、作業の標準化及び安全管理等の建設工事の機械化作業を進める上で必須の施工管理についても示し、土木建設業の近代化を進める上での大きな足跡を残した。

また、これら大型機械の性能は、関連する機械製造業界にも多大な刺激を与えたという点で、土木建設業ばかりでなく、日本の製造業界全体の技術水準の向上にも大きな貢献をしたといえよう。

その後、機械化施工の進展としては、細骨材製造設備の改善、地形に適したケーブルクレーンの使用、人工冷却設備の改善、施工の効率化を図ったパイプローザの開発等が挙げられよう。

5. コンクリートダムの合理化施工^{16),17)}

佐久間ダムの建設以降のコンクリートダムの進展は、略史及び年表に示すとおりであって、大型化・高能率化した設備・機械を用いた施工が行われていたが、重力ダム、アーチダムともに継目で囲まれた狭いブロック内の作業であるため、ダム全体工事費に占める機械費が多くなる割合に、人件費の節約に見合った経済効果が次第に得難くなってきた。同時に、ダム建設地点についても、アーチダムのような堤体積の少ないダムを建設できるような場所がきわめて少なくなり、かえって岩盤強度が低いために、通常より底幅を増した重力ダム（堤体積がより大きいダム）を計画せざる得なくなった。

このような背景から、経済性を検討して、材料費、人件費の節約ばかりでなく、施工面からコンクリート単価の低減を図ってダム建設コストを抑制する必要が生じてきた。

前述の「コンクリートダム合理化施工研究委員会」における調査結果からも、コンクリートの練混ぜ・運搬・打込み・締固め等一連の施工の合理化に焦点を絞ることが効果的であることが明らかである（図-1）。大型土工機械の進展により高まったフィルダム建設における経済性を参考とし、海外のコンクリートダム合理化施工の研究状況等を踏まえた検討結果から生まれた施工法が、Roller Compacted Dam Concrete 工法（RCD 工法）である。

RCD 工法は、単位セメント量120もしくは130 kg/m³、単位水量100 kg/m³程度のRCD用コンクリー

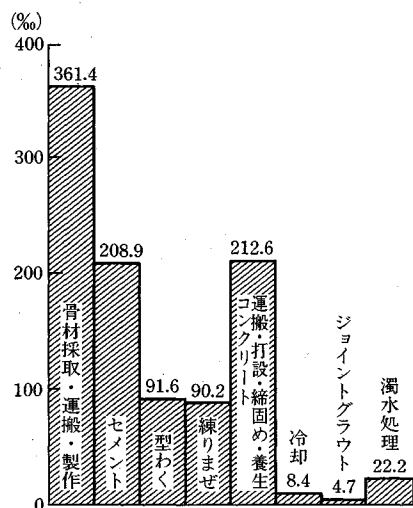


図-1 コンクリート単価構成比率¹⁶⁾

トを、文字どおり振動ローラで転圧し締固める工法であり、本工法により竣工した島地川ダムは、世界で初めてのダムとして著名である。RCD 工法についての詳細は多くの記述もあるので省略するが、海外で施工例の多い Roller Compacted Concrete 工法（RCC 工法）と比較して、ダムの大切な機能の一つである遮水性がきわめて高く、設計方法も今日までのコンクリートダムと同じで信頼性が高いこと等から中国の観音閣ダムにおいても採用されている。

さらに、建設省所管事業における重力ダムには、堤体積10万m³以下のダム（高さ50m以下）が約20%程度あるところから、このような小規模ダムを対象とした合理化施工の検討が行われ、コンクリートの運搬に従来のケーブルクレーンに代わるベルトコンベアあるいはコンクリートポンプを用いる施工法の研究が工事現場への適用を図りつつ進められている。

RCD 工法の適用例は、日本国内ですでに約30ダムに達しており、中には玉川、境川、宮ヶ瀬等の高さ100mを越え、堤体積も100万m³を越えるダムも複数含まれている。そして、コンクリートの運搬方法についても、当初島地川ダムで行われたケーブルクレーンとダンプトラックの併用方式からインクライン方式、ダンプトラック直送方式と地形条件に応じて変わり、近くベルトコンベア方式も行われようとしている。そして、RCD 工法と拡張レイヤー工法とを組合わせて施工した布目ダム（高さ72m、堤体積33万m³、1991年）のように、コンクリートダムの合理化施工は、条件に応じて多様な変化を試みながら、現在もなお進展¹⁸⁾を続けている。

6. 設計法の進歩とコンクリート強度の研究⁶⁾

コンクリートダムの建設が重力ダムに始まり、それが次

第に大規模な高さ100mを超えるようになった時の設計思想の変遷、すなわち岩着部や打継ぎ部において丁寧な施工を行っていたにもかかわらず、相互の付着を考慮に入れていなかった初期の設計法を改善して、「ダムの滑動安定はせん断摩擦安全率を用いて検討する。」という規定が設けられた、ダム設計基準制定における経緯は、飯田隆一博士の近著⁹⁾に詳しい。

ダムの高さが大きくなるにつれて滑動安定の検討が重要になるところから、畑野正博士ならびに伊東茂富博士によって、せん断強度および組合せ応力状態における強度に関する研究が行われ、設計に用いるせん断強度、内部摩擦角等の諸数値が明らかにされた。

このせん断摩擦安全率の適用は、基礎岩盤の弱い箇所に大規模ダムを建設するような場合でもフィレットを付けることで処置が可能となる等、後の100m以上の大ダムの進展にたいする大きな貢献となった。その後、基準類にしたがって適正な施工を行っているかぎり、コンクリートダムの堤体部には滑動安定に関する問題を生じないことも分かり、検討の対象部分は次第に基礎岩盤に移っていった。

最近、RCD工法により大ダムを建設する機会が多くなり、再度、堤体の水平打継ぎ面におけるせん断摩擦安全率が話題となったが、各種の試験結果から敷きモルタル等の打継ぎ目処理をする限り打継ぎ部分においても問題のないことが確認されている。

日本におけるアーチダムの本格的な設計は上椎葉ダム、鳴子ダムに始まるが、当初の設計手法は、米国のフーバーダム建設等で行われていた計算を主とした設計手法が用いられていた。しかし、より合理的な形状を追求する上から次第に計算よりは模型実験に主体をおいた設計が行われるようになり、優美な形を示すドーム型アーチダムが生まれことになった。このアーチダム建設においても、前記両博士の組合せ応力状態に関する研究は、堤体コンクリートの品質を設定するために不可欠なものであった。

なお、設計法のうち温度応力解析に関連する研究も多数あるが紙数の限りもあり、本文では恐縮ではあるが割愛させて戴いた。

7. あとがき

以上に述べたダムコンクリートの歴史は、総論的に表現すれば、社会に必要な構造物を半永久的に使用するため、寿命に影響する要因の抑制を図りながら、耐久力の高い品質のコンクリートを用いて、建設環境にたいする配慮も加えつつ、しかも社会経済に影響する建設コストをいかに安くするかの努力に終始したコンクリートダム建設の歴史であるということができよう。

栄えある歴史を執筆させて戴いたが、先人の深甚なご努力に比べて真にふつつかであって、貴重な記録についても十分に表現し得なかった点が多々ありましたことをお詫びを申し上げます。

なお、本文を取りまとめるにあたり、有泉 昌、飯田隆一、坂本好史、穂積 豊、山住有巧、山田順治の有識者の方々からご指導を賜ったことに厚く御礼を申し上げます。特に設計法に関する項目では飯田隆一氏の近著から引用させて戴いた点が多く、このことについて深謝致します。また、貴重なダム工事誌を多忙な業務の中でご執筆された関係各位に厚く敬意を表します。年表の記録は、土木学会編日本土木史に基づくとともに1966年以降は既発表の工事報告類により、特記事項のある、もしくは高さ130m以上のダムについて作成致しました。

参考文献

- 1) 石井頼一郎：小牧発電工事報告，土木学会誌，18巻4号，1932.4.
- 2) 日本セメント（株）：浅野セメント沿革史，1940.11.
- 3) 田代信雄・是石俊文：塚原ダムコンクリートの材令30年試験，セメントコンクリート，No.304，1972.
- 4) 佐藤時彦：鴨緑江水豊堰堤工事概要，土木学会誌，30巻1号，1944.1.
- 5) 永田年：機械化施工の黎明，土木学会誌，60巻1号，1975.1.
- 6) 飯田隆一：コンクリートダムの設計法，技報堂出版，1992.4.
- 7) 徳根吉郎：2,3のダム用コンクリートの長期強度，硬化熱とセメントの性質に関する研究，大ダム，No.27，1964.
- 8) 大場正男ほか：最近のダムに用いられたセメントの品質，セメントコンクリート，No.226，1965.
- 9) 国分正胤ほか：フライアッシュを用いた各種形式の大ダムにおける配合設計，大ダム，Vol.27，1964.
- 10) (財)国土開発技術研究センター：ダム用コンクリートにおけるフライアッシュ利用の手引き，1991.5.
- 11) 土木誌編集委員会：八幡製鉄所土木誌，新日本製鉄株式会社八幡製鉄所，1976.11.
- 12) 望月邦夫：鎧畑ダム用高炉セメントについて，発電水力，Vol.28，1957.5.
- 13) 吉越盛次・穂積豊：ダムコンクリートの品質，一電源開発（株）が過去10年間に建設したダムについて，セメントコンクリート，No.215，1965.
- 14) 三村通精ほか：奥只見ダムにおける骨材生産について，大ダム，Vol.17，1961.
- 15) 日本の土木技術編集委員会：日本の土木技術—近代土木発展の流れ—，土木学会，1975.7.
- 16) 広瀬利雄ほか：コンクリートダム合理化施工の現況と課題，コンクリート工学，Vol.20，No.8，1982.
- 17) 志水茂明ほか：RCD工法に関する最近の調査研究，土木学会論文集，No.408，1989.8.
- 18) 山住有巧：コンクリートダム合理化施工の発展と課題，ダム技術増刊，No.1，1991.

(1992.6.15 受付)